

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры (КУДРА)

Тренкаль Е.И., Назаров М.А., Сокуренок В.А., Артищев С.А.

Интегральный усилитель на основе полевого транзистора с затвором Шоттки

Учебно-методическое пособие по проведению курсовой и самостоятельной работы

Томск 2026

УДК 004.42
ББК 32.844
Т 66

Рецензент:

Рагимова Н.С., доцент кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР, канд. техн. наук

Тренкаль, Евгений Игоревич

Т 66 Интегральный усилитель на основе полевого транзистора с затвором Шоттки: учебно-методическое пособие по проведению курсовой и самостоятельной работы по дисциплине «Интегральные устройства радиоэлектроники» / Е.И. Тренкаль, М.А. Назаров, В.А. Сокуренок, С.А. Артищев. – Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 53 с.

Методические указания предназначены для обеспечения качественного проведения курсовых занятий и организации самостоятельной работы студентов.

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 261 от 06.02.2026 г.

УДК 004.42
ББК 32.844

©Тренкаль Е.И., Назаров М.А., Сокуренок В.А., Артищев С.А., 2026

© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

1 Введение.....	4
2 САПР AWR Design Environment.....	6
2.1 Среда проектирования Microwave Office.....	6
2.2 Создание проекта	8
2.3 Создание выходных графиков	11
2.4 Создание выходных выражений и переменных	13
3 Создание схемы усилителя.....	18
3.1 Работа с моделью полевого транзистора с затвором Шоттки	18
3.2 Анализ характеристик транзистора в Microwave Office.....	19
3.3 Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов	21
3.4 Построение ВАХ транзистора в MWO	23
3.5 Анализ характеристик транзистора	27
3.6 Определение параметров усилителя	28
4 Разработка топологии	31
4.1 Расчет геометрических параметров резисторов.....	31
4.2 Расчет геометрических параметров конденсаторов	35
4.3 Разработка топологии усилителя и фотошаблонов	38
5 Технология изготовления	41
Список используемых источников	52
Приложение А (обязательное) Варианты заданий.....	53

1 Введение

В настоящее время в мире наблюдается быстрое развитие приемо-передающих устройств, работающих в СВЧ диапазоне. Такие устройства применяются в спутниковой, космической, сотовой связи, радиолокации, телеметрии, телевидении, радиовещании, измерительной технике и беспроводных системах передачи данных.

Всё чаще обозначенные выше устройства частично или полностью проектируются в виде монолитных интегральных схем, которые, помимо улучшения основных технических характеристик радиоэлектронных средств (РЭС) позволяют снизить массу и габариты РЭС, повысить надежность и КПД, уменьшить стоимость при серийном производстве [1, с.3].

Изучением, разработкой и изготовлением РЭС в микроминиатюрном исполнении занимается микроэлектроника (интегральная электроника). В основу микроэлектроники положен схемотехнический принцип, заключающийся в использовании обычных методов реализации узлов и блоков РЭС на базе радиоэлементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.) и разработке электрических схем на основе теории цепей. Отличие от традиционных методов состоит в том, что в ИС элементы объединяются (интегрируются) в объеме полупроводника или на поверхности подложки [2, т. 1, с. 6].

В данном учебном пособии рассматривается процесс проектирования функциональных СВЧ-устройств от исходных технических требований до реализации в интегральном исполнении на подложке GaAs. Большое внимание уделено процессам моделирования, топологическому расчету и технологии изготовления функционального устройства. В результате выполнения курсового проекта должно быть сформировано комплексное представление о всех этапах проектирования и изготовления устройств интегральной техники.

Этапы выполнения курсового проекта:

1) ознакомиться с теоретическим материалом по работе в Microwave Office (MWO) (раздел 2);

2) выполнить разработку и моделирование схемы усилителя на основе полевого транзистора с затвором Шоттки (раздел 3) согласно индивидуальному варианту (приложение А):

2.1) определить режим работы транзистора в зависимости от используемой схемы (раздел 3.1). Реализовать заданный режим в Mathcad файле. Изучить и определить влияние параметров материалов и геометрии транзистора;

2.2) добавить модель транзистора в MWO и сконфигурировать согласно полученным в п.2.1 параметрам (раздел 3.2). Построить и проанализировать ВАХ транзистора (разделы 3.3, 3.4);

2.3) построить каскад усилителя согласно схеме и основные характеристики согласно заданию (разделы 3.5, 3.6). Оценить влияние элементов цепи на выходные параметры. Добиться параметров согласно варианту задания. В случае необходимости увеличить количество используемых каскадов усиления;

3) реализовать топологию разработанного по п.2 усилителя и его технологию изготовления (разделы 4, 5):

3.1) выбрать используемые материалы, разработать топологии отдельных элементов (резисторов, конденсаторов, транзисторов) для достижения полученных в разделе 2 номиналов (разделы 4.1, 4.2);

3.2) разработать топологию интегральной схемы (раздел 4.3);

3.3) разработать технологию изготовления интегральной схемы (раздел 5);

4) оформить отчет.

2 САПР AWR Design Environment

Одним из популярных программных продуктов, используемым для проектирования радиочастотных устройств и устройств СВЧ, является AWR DESIGN ENVIRONMENT (AWRDE). Он включает в себя три мощных инструментальных средства: Microwave Office (MWO), Visual System Simulator (VSS) и Analog Office (ANO). Эти средства интегрированы в единую среду проектирования и могут использоваться вместе, не выходя из среды проектирования.

Microwave Office позволяет создавать схемы, состоящие из элементов схем (сосредоточенных и распределённых) и электромагнитных структур. Для моделирования можно использовать один из методов: линейное моделирование, усовершенствованный гармонический баланс, ряды Вольтера, электромагнитное моделирование (EMSight) или дополнительный имитатор HSPICE. Результаты могут выводиться в различных графических формах или в таблице в зависимости от цели проводимого анализа. Можно настраивать или оптимизировать проекты и все изменения немедленно и автоматически отражаются на графиках и в топологии.

2.1 Среда проектирования Microwave Office

Запуск Microwave Office: Пуск ► AWR Design Environment. Откроется главное окно программы Microwave Office (рис. 2.1). В таблице 2.1 представлено описание компонентов главного окна программы.

Таблица 2.1 – Основные компоненты среды

Компонент	Описание
Панель меню	Строка выпадающих меню, расположенная в верхней части окна, для выполнения различных задач Microwave Office.
Панель инструментов	Расположена под панелью меню и содержит набор кнопок быстрого доступа к часто используемым командам (создать новую схему, провести симуляцию, запустить подстройку параметров и т.п.). Активность кнопок зависит от используемых функций и активных окон. При наведении курсора на кнопку отображается её название и/или назначение.
Окно проекта	Древовидная структура групп и модулей, которая определяет активный проект Microwave Office, включая схемы, электромагнитные структуры (ЕМ), частоты моделирования и выходные графики.
Рабочая область	Зона, в которой проектируются схемы, электромагнитные структуры (ЕМ), отображаются и редактируются топологии, и выводятся графики.
Строка состояния	Выводит информацию в зависимости от текущего активного элемента или действия.

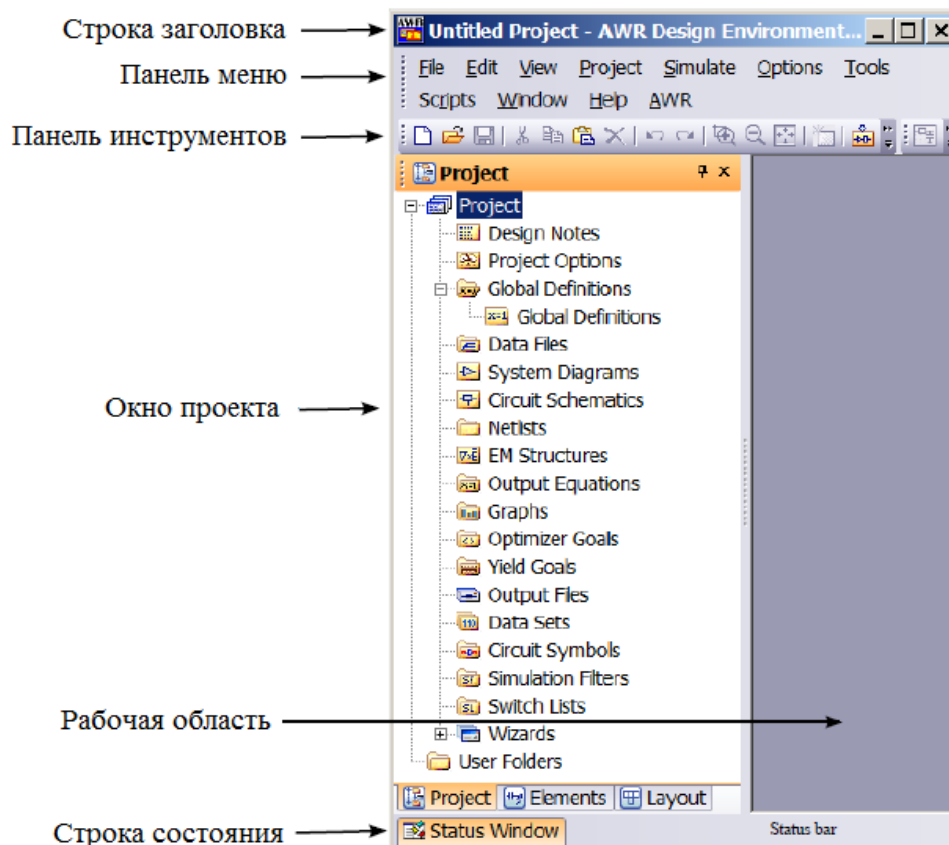


Рисунок 2.1 – Главное меню Microwave Office

Строка панелей, расположенная в нижней части левого окна, позволяет переключать содержимое между следующими окнами:

- **Project** – включает окно просмотра проекта;
- **Elements** – включает окно просмотра элементов для формирования схем;
- **Layout** – включает окно менеджера топологии, которое позволяет определить параметры для черчения и просмотра топологии.

Вкладка Project.

На вкладке **Project** левого окна проекта отображается дерево групп и модулей, которые уже используются, а также могут быть использованы в данном проекте. Сюда входят:

- модуль примечаний к проекту (**Design Notes**);
- модуль задания глобальных опций проекта (**Project Options**);
- модуль глобальных выражений (**Global Equations**);
- модуль использования внешних файлов данных (**Data Files**);
- группа используемых схем системы для **VSS**, если **VSS** установлено (**System Diagrams**);
- группа используемых схематических модулей (**Circuit Schematics**);
- группа используемых электромагнитных структур (**EM Structures**);

- модуль выходных соотношений (**Output Equations**);
- группа отображения результатов анализа (**Graphs**);
- группа целей оптимизации (**Optimizer Goals**);
- группа целей статистического анализа (**Yield Goals**);
- список выходных файлов (**Output Files**);
- группа мастеров (**Wizards**);

Двойной щелчок мышкой по группе или модулю вызывает различные действия в зависимости от назначения группы или модуля. Двойной щелчок по **Design Notes**, **Global Definitions** и **Output Equations** открывает соответственно окна для создания примечаний к проекту (это одно из немногих мест в Microwave Office, где можно использовать русские буквы), создания глобальных определений проекта и создания выходных соотношений. Двойной щелчок по **Project Options**, **System Diagrams** и **Circuit Schematics** открывает диалоговые окна для определения соответствующих опций. Двойной щелчок по остальным группам и модулям не вызывает никаких действий.

Щелчок правой кнопкой мышки (ПКМ) по любой группе или модулю, а также по любому объекту проекта, открывает контекстные меню, предлагающие на выбор список возможных дальнейших действий.

2.2 Создание проекта

Для создания нового проекта нужно выбрать в меню **File ► New Project**. Затем нужно дать имя новому проекту, выбрав **File ► Save Project As** в том же меню. Имя проекта отображается в заголовке окна.

Для открытия существующего проекта нужно выбрать **File ► Open Project**.

Для сохранения текущего проекта нужно выбрать **File ► Save Project**.

Создание схемы.

Схемы в среде Microwave Office могут быть описаны графически или списком цепей в текстовом формате. Проект Microwave Office может включать множество линейных и нелинейных схем и/или списков цепей, а также электромагнитных структур.

Чтобы создать новую схему, нужно щёлкнуть ПКМ по группе **Circuit Schematics**, выбрать **New Schematic** (рис. 2.2). В открывшемся поле ввода необходимо ввести имя схемы. Если на жёстком диске имеется файл, который содержит схему, то схему из этого файла можно импортировать в проект, для этого используется **Import Schematic**. Также возможно связать схему из файла с проектом, выбрав **Link To Schematic**. В этом случае схема не включается в

проект. Файл со связанной схемой нельзя удалять или переносить в другую директорию. Аналогичные операции можно выполнять и для списков цепей.

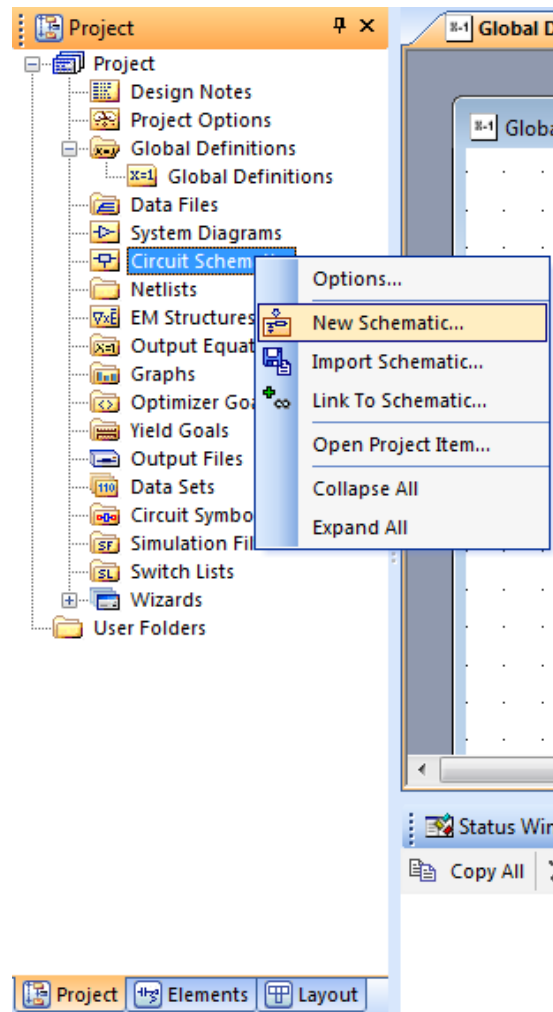


Рисунок 2.2 – Создание схемы

После того, как определено имя схемы или списка цепей, на рабочем поле открывается пустое окно схемы, в заголовке которого отображается присвоенное имя, а в окне просмотра проектов отображается новая схема, как подгруппа в группе **Circuit Schematics**. Подгруппа новой схемы или списка цепей содержат все параметры и опции, которые определяют и описывают схему или список цепей. Кроме того, меню и панель инструментов отображают новый специфический набор команд и инструментов для формирования и моделирования схемы или списка цепей.

Добавление элементов в схему.

Чтобы добавить элементы в схему, необходимо в левом окне проекта перейти к вкладке просмотра элементов (**Elements**) в нижней части левого окна (рис. 2.3).

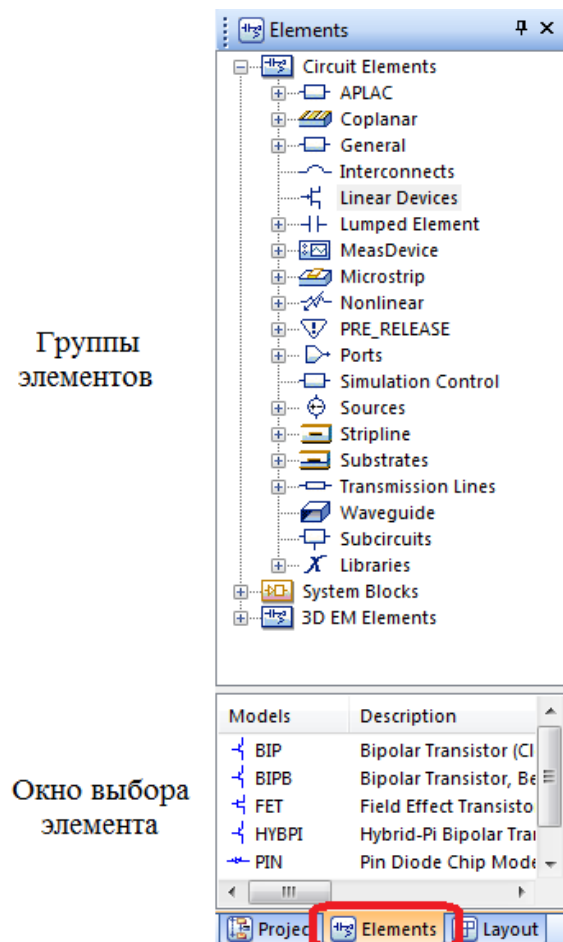


Рисунок 2.3 – Добавление элементов

Нажатие на «+» группы позволяет отобразить список подгрупп и элементов данной категории. Нажатие на группу или элемент в нижней части отображает доступные для добавления на схему элементы (рис. 2.3, окно выбора элемента). Чтобы добавить нужный элемент на схему, переместите его в рабочую область окна схемы. В процессе переноса компонента нажатием ПКМ элемент можно вращать.

Рядом с графическим изображением элемента будет расположено поле его параметров. Настройка параметров элемента может быть выполнена прямым редактированием (двойной клик ЛКМ по значению параметра), либо через окно свойств элемента, которые можно открыть двойным кликом ЛКМ по графическому изображению компонента на схеме. Для повышения удобства чтения схемы поле параметров можно переместить в любое другое место, зажав ЛКМ.

Чтобы добавить в схему обычный порт для линейного моделирования, щёлкните по группе Ports (Порты) в окне просмотра элементов, перетащите элемент Port в окно схемы и установите в нужное место. Порт можно так же добавить в схему, щёлкнув по значку **Port** 

(Ctrl+P) на панели инструментов. Для добавления земли (точки нулевого потенциала), щёлкните по значку **Ground**  на панели инструментов (Ctrl+G).

Электрическое соединение элементов может быть выполнено рисованием ветви между их узлами. Для начала рисования ветви необходимо поместить курсор на узел элемента (курсор отобразится в виде соленоида), нажать ЛКМ и провести ветвь до узла назначения. Для повышения удобства чтения схемы можно выполнять изгибы ветви промежуточным нажатием ЛКМ.

2.3 Создание выходных графиков

Microwave Office даёт возможность просматривать результаты моделирования в виде различных графиков. Чтобы создать график, нажмите на иконку **New Graph** на панели инструментов или щёлкните ПКМ по группе **Graphs** (Графики) в окне просмотра проектов и выберите **Add Graph** (Добавить график) из всплывающего меню. Появится диалоговое окно, в котором нужно задать имя графика и его тип. Пустой график появится на рабочем поле, и имя графика появится как подгруппа в группе **Graphs** в окне просмотра проекта. Доступны следующие виды графиков:

Таблица 2.2 – Виды графиков

Тип графика	Описание
Прямоугольный	Отображает измеряемые величины по осям X – Y, обычно по частоте
Диаграмма Смита	Отображает импедансы или адмитансы на круговой диаграмме
Полярный	Отображает величины и углы измеряемых величин
Гистограммы	Отображает измеряемые величины в виде гистограммы
Антенная диаграмма	Отображает измеряемые величины в виде диаграммы направленности
Таблица	Отображает измеряемые величины в виде таблицы, обычно по частоте

Чтобы определить, какие данные вы хотите видеть на графике, щёлкните ПКМ на поле графика или на его имени графика в окне просмотра проекта и выберите **Add Measurement**. Откроется диалоговое окно, в котором можно выбрать необходимое из списка измеряемых величин.

Полученный после выполнения анализа график можно закрепить, чтобы его можно было сравнить с другими вариантами моделирования, например, при каких-то изменениях в схеме. Чтобы закрепить график выберите в меню **Graph ► Freeze Traces** при активном окне графика. Затем выполните изменение в схеме и выполните анализ снова. Чтобы снять закрепление графика выберите в меню **Graph ► Clear Frozen**.

Установка частот для анализа.

Чтобы установить частоты для моделирования, дважды щёлкните по группе **Options** (Опции) в окне просмотра проектов или выберите в меню **Options ► Project Options** (рис 2.4).

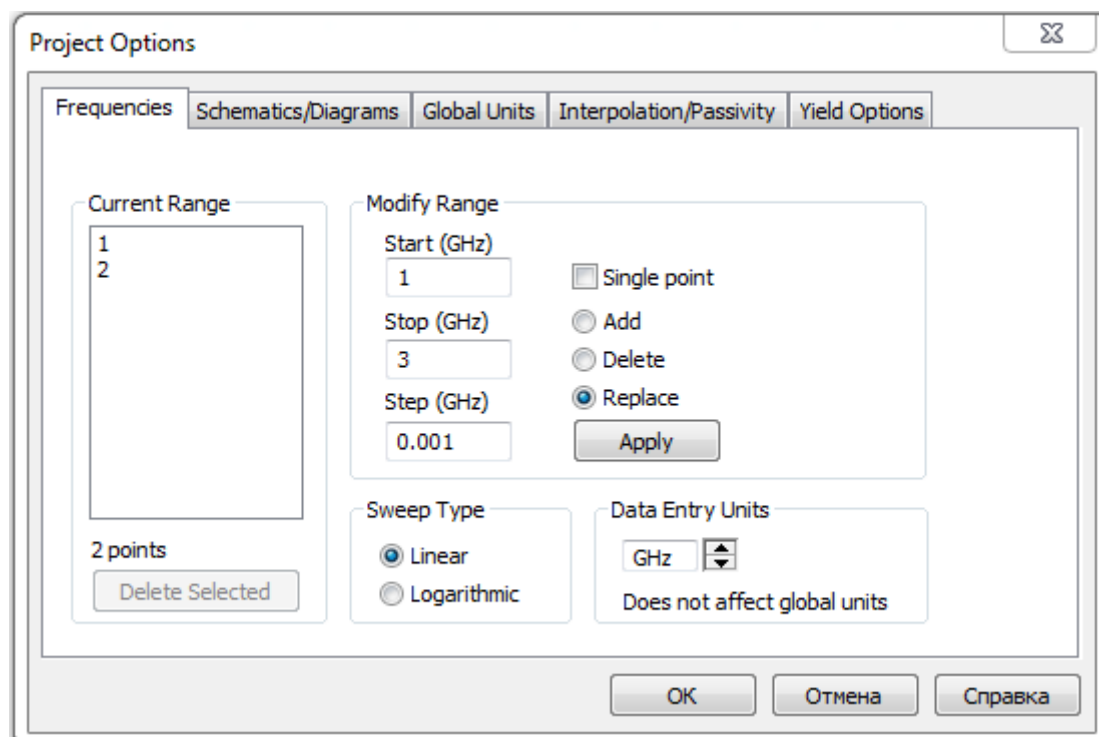


Рисунок 2.4 – Установка частот анализа моделирования

Откроется диалоговое окно, на вкладке **Frequencies** которого можно определить частоты для моделирования.

В области **Data Entry Units** (ввод единицы измерения данных) установите GHz. Наберите в поле **Start** начальную частоту, **Stop** – конечную частоту и в поле **Step** – шаг и нажмите **Apply**. В окне **Current Range** текущий частотный диапазон изменится.

По умолчанию все созданные в проекте схемы используют для анализа частоты, установленные в этом окне. Для любой схемы или электромагнитной структуры проекта вы можете отменить использование частот проекта и назначить индивидуальные частоты для анализа данной схемы или структуры. Для этого щёлкните ПКМ по имени схемы или электромагнитной структуры в окне просмотра проекта и выберите **Options**. В открывшемся диалоговом окне снимите “галочку” в **Use project defaults** и введите частоты, которые будут использоваться только для выбранной схемы или структуры.

Чтобы выполнить моделирование созданного проекта, выберите в меню **Simulate ► Analyze** или щёлкните левой кнопкой мышки по значку **Analyze**  на панели инструментов.

После окончания моделирования, результаты можно просматривать на созданных графиках и затем настраивать и/или оптимизировать при необходимости. Блок настройки Microwave Office в режиме реального времени позволяет сразу же наблюдать изменение выходных параметров на графике при изменении параметров схемы движком тюнера или при проведении оптимизации. При настройке или оптимизации автоматически изменяется схема и связанные с изменяемыми параметрами элементы топологии. Для настройки схемы нажмите значок **Tune Tool**  на панели инструментов и выберите параметры в схеме, которые вы желаете настроить. Затем нажмите значок **Tune** , чтобы их настроить.

2.4 Создание выходных выражений и переменных

Выходные выражения позволяют создавать переменные и зависимости (массивы), что может быть полезно при обработке данных.

Чтобы создать поле выходных выражений, на панели проекта необходимо нажать ПКМ на **Output Equation ► New Output Equation** (рисунок 2.5).

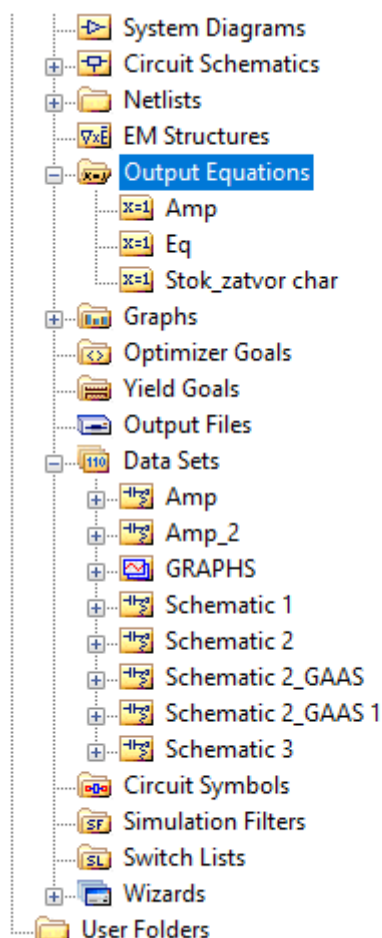


Рисунок 2.5 – Создание выходных выражений переменных

Откроется поле, в котором можно выполнять два основных действия:

1) добавить выражение (**Draw ► Add Equation**);

2) добавить выходное выражение (**Draw ► Add Output Equation**) или функцию.

Выражения необходимо разместить на поле в свободном месте с учетом последовательности расчета от верхнего выражения к нижнему.

Основные лексемы, структурные единицы и функции:

– присвоение: =;

– арифметические: +, -, *, /, % (остаток от деления) и др.;

– логические: <, >, <=, >= и др.:

Для вывода на экран содержимого функции нужно ввести имя переменной и поставить двоеточие, после чего запустить анализ.

Пример:

A=5

B=4

C = A+B

C: 9

– массивы:

Поддерживаются только одномерные и двумерные массивы. Нумерация массивов начинается с 1. Запись значений в массив выполняется через фигурные скобки, выделение (возврат) фрагментов массива – через квадратные скобки. Символ «*» в операции возврата используется для возврата всех элементов данной строки/столбца:

X[*] – вернуть весь 1D массив;

X[3, *] – вернуть третью строку 2D массива;

X[* ,1] – вернуть первый столбец 2D.

Вместо одной строки или столбца можно указать несколько строк: X[{1,3,7}] – вернуть 1, 3, 7 элемент массива.

Пример:

A={1,2,3}

B=4

C = A+B

C: { 5,6,7 }

C[1]: 5

C[{1,3}]: { 5,7 }

- тригонометрические функции: $\sin(x)$, $\arctan(x)$ и др.;
- функции преобразования: $\text{stof}(x)$ – Цельсии в Фаренгейты, $\text{db}(x)$ – в дБ и др.;
- функции операций с массивами: $\text{amax}(x)$, где x -массив – найти максимальный элемент в массиве; $\text{asum}(x)$ – сумма всех элементов массива; $\text{assize}(x)$ – размер массива и др.;
- встроенные переменные: $_FREQ$ – содержит все анализируемые частоты, указанные в Project options.

Другие функции можно посмотреть в справке Microwave office, AWR Design Environment User Guide, раздел 12.

Выходное выражение (**Output Equation**) подобно добавлению данных на график, только массив данных записывается в переменную с заданным именем (рисунок 2.6). Имя вводится в поле Variable name. Например, можно добавить зависимость напряжения от частоты на каком-либо элементе.

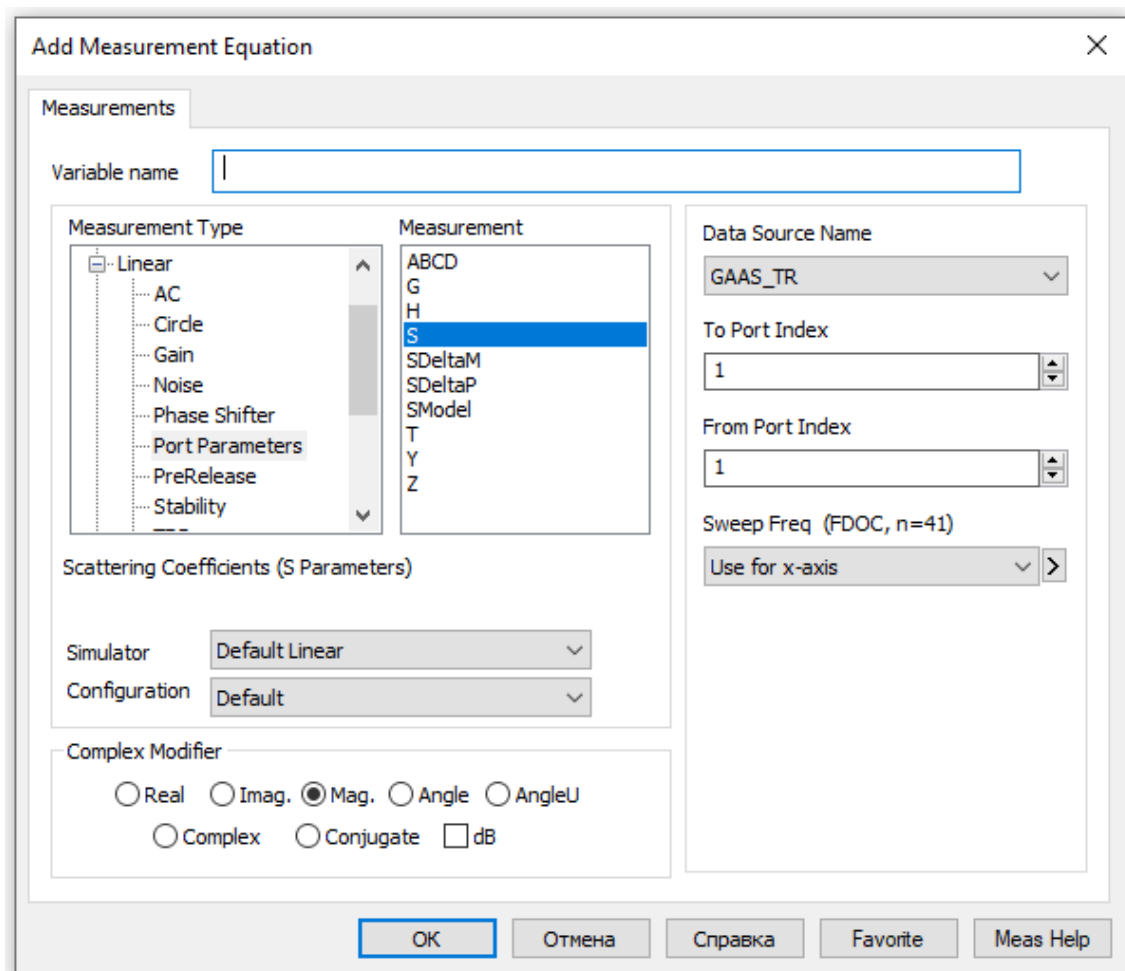


Рисунок 2.6 – Меню добавления выходных выражений для Output Equation

Пример: расчет коэффициента усиления

Добавление напряжения на входе: Draw – Add Output Equation. Называем переменную Vin. Выбираем раздел AC, выбираем Vac (напряжение в узле или на элементе). В поле Data Source Name выбираем анализируемую схему. Нажав на троеточие (рисунок), можно выбрать элемент или узел на схеме.

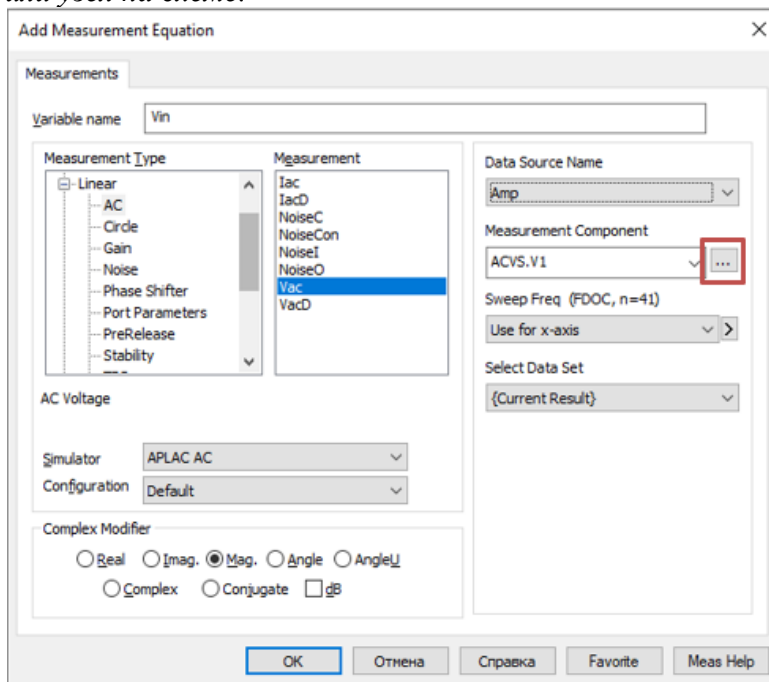


Рисунок 2.7 – Меню для задания входного напряжения малошумящего усилителя

Нажимаем OK и размещаем строку в поле.

$V_{in} = \text{Amp.AP:}|V_{ac}(\text{ACVS.V1})|$

Те же действия выполняются для элемента нагрузки, переменную называем Vout.

$V_{in} = \text{Amp.AP:}|V_{ac}(\text{ACVS.V1})|$

$V_{out} = \text{Amp.AP:}|V_{ac}(\text{RES.Rn})|$

После этого вводим переменную (Draw-Add Equation) K – отношение выходного напряжения к входному.

$V_{in} = \text{Amp.AP:}|V_{ac}(\text{ACVS.V1})|$

$V_{out} = \text{Amp.AP:}|V_{ac}(\text{RES.Rn})|$

$K = \text{db}(V_{out}/V_{in})$

Для добавления полученной величины на график необходимо создать график (по разделу 2.4), добавить измерение:

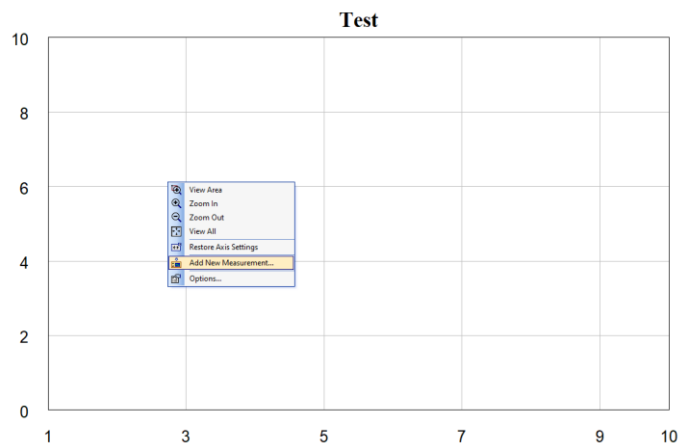


Рисунок 2.8 – Создание графика выходных данных

Выбрать раздел *Output Equations*, после чего выбрать переменную, которую необходимо вывести на график.

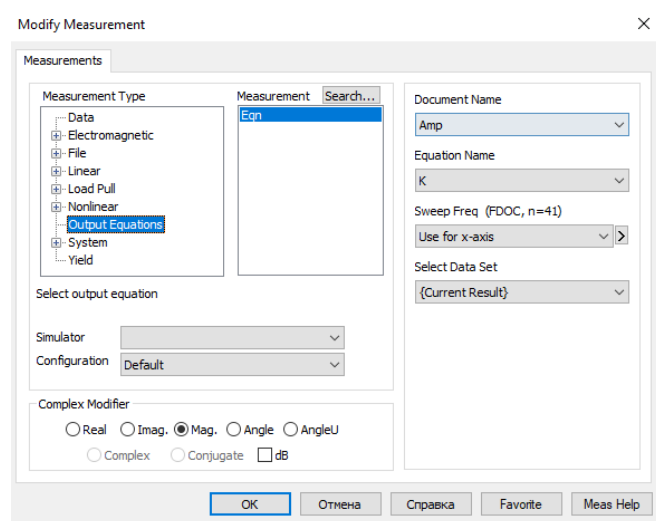


Рисунок 2.9 – Меню построения коэффициента усиления малошумящего усилителя

В результате полученная зависимость коэффициента усиления будет отображена на графике.

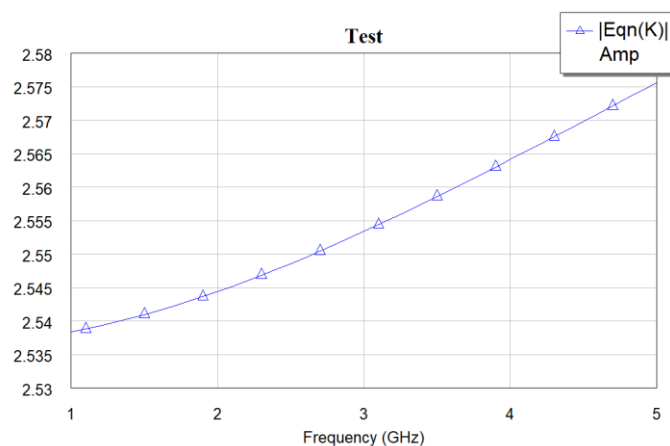


Рисунок 2.10 – График зависимости коэффициента усиления усилителя от частоты

3 Создание схемы усилителя

В результате должна быть получена схема с параметрами согласно индивидуальному заданию (приложение А).

Основные параметры усилителей:

- коэффициент усиления K_u (дБ) напряжения – отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного сигнала;
- диапазон усиливаемых частот – диапазон частот, в котором должен быть обеспечен заданный коэффициент усиления. Чаще всего задается через нижнюю (f_n) и верхнюю (f_v) частоту;
- коэффициент частотных искажений M – коэффициент, описывающий изменение величины коэффициента усиления на разных частотах. Равен отношению K_u на средней частоте к K_u на текущей частоте.
- коэффициент шума $K_{ш}$ – отношение $(P_c/P_{ш})_{вх}$ к $(P_c/P_{ш})_{вых}$, где $(P_c/P_{ш})_{вх}$ – отношение мощности сигнала к мощности шума на входе; $(P_c/P_{ш})_{вых}$ – отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе.

3.1 Работа с моделью полевого транзистора с затвором Шоттки

Описание математической модели транзистора расположено в Mathcad файле (выдается преподавателем). Подробнее с принципом работы транзистора можно ознакомиться в учебном пособии [3]. Анализ математической модели позволит упростить процесс понимания принципа работы транзистора и определить влияние его параметров (геометрии и материалов) на выходные параметры транзистора.

После получения индивидуального задания и определения схемы для проектирования (рисунок 3.1) по модели необходимо задать значения транзистора таким образом, чтобы получить нормально-открытый или нормально-закрытый режим работы транзистора.

Схемы *a* и *в* используются для транзистора с нормально-открытым каналом, *б*, *г* – с нормально-закрытым каналом.

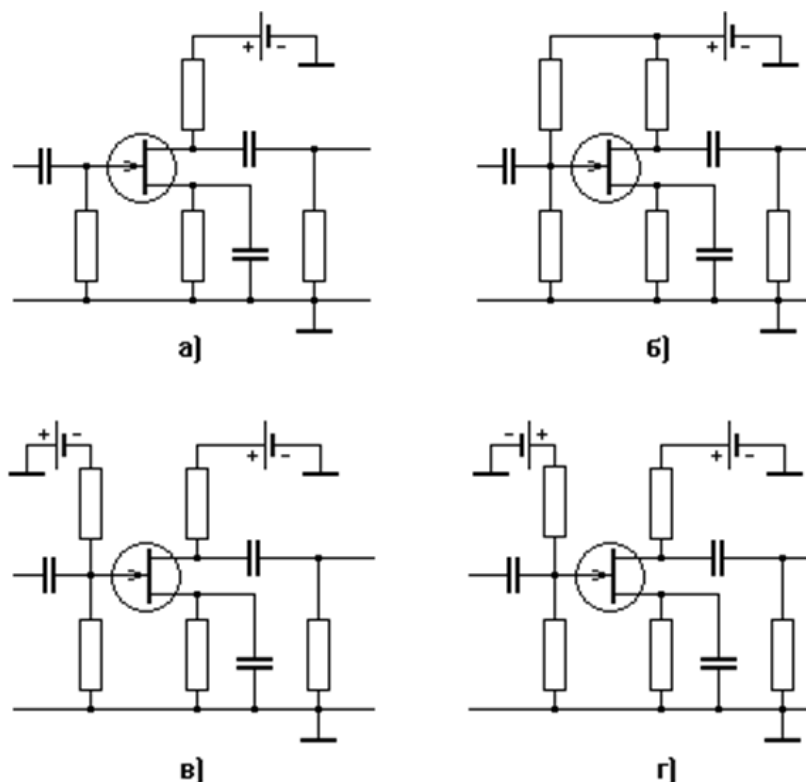


Рисунок 3.1 – Схемы усилительных каскадов

Для этого необходимо обратить внимания на параметр Dh ($y0$ в [4]) – толщина обедненного слоя при отсутствии внешних напряжений Vg, Vd . Для транзисторов с нормально открытым каналом величина Dh должна быть меньше толщины самого канала, для транзисторов с нормально закрытым каналом – наоборот.

Для получения необходимого значения нужно проанализировать, какие параметры влияют на Dh , и внести соответствующие изменения в варьируемые параметры (обозначены зеленым цветом).

Например, для транзистора с нормально-закрытым каналом необходимо, чтобы величина Dh была больше ak . Повысить Dh можно путем уменьшения концентрации носителей N . Вторым путем – понизить значения ak , при этом следует учитывать, что уменьшение толщины ak имеет технологические ограничения.

3.2 Анализ характеристик транзистора в Microwave Office

После получения необходимого режима работы транзистора можно перейти к его анализу в Microwave Office. Для этого необходимо импортировать модель транзистора в среду. Для добавления в окне проекта (Project) необходимо нажать ПКМ на компоненте Netlists, выбрать Import Netlist..., после чего выбрать файл модели транзистора GAAS.net (выдается преподавателем).

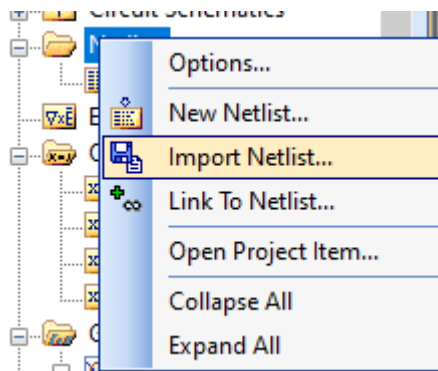


Рисунок 3.2 – Меню для импортирования описания параметров транзисторов

После этого необходимо создать схему для анализа характеристик и добавить транзистор на эту схему. Найти транзистор можно во вкладке Elements в разделе Subcircuits (рисунок 3.3, а).

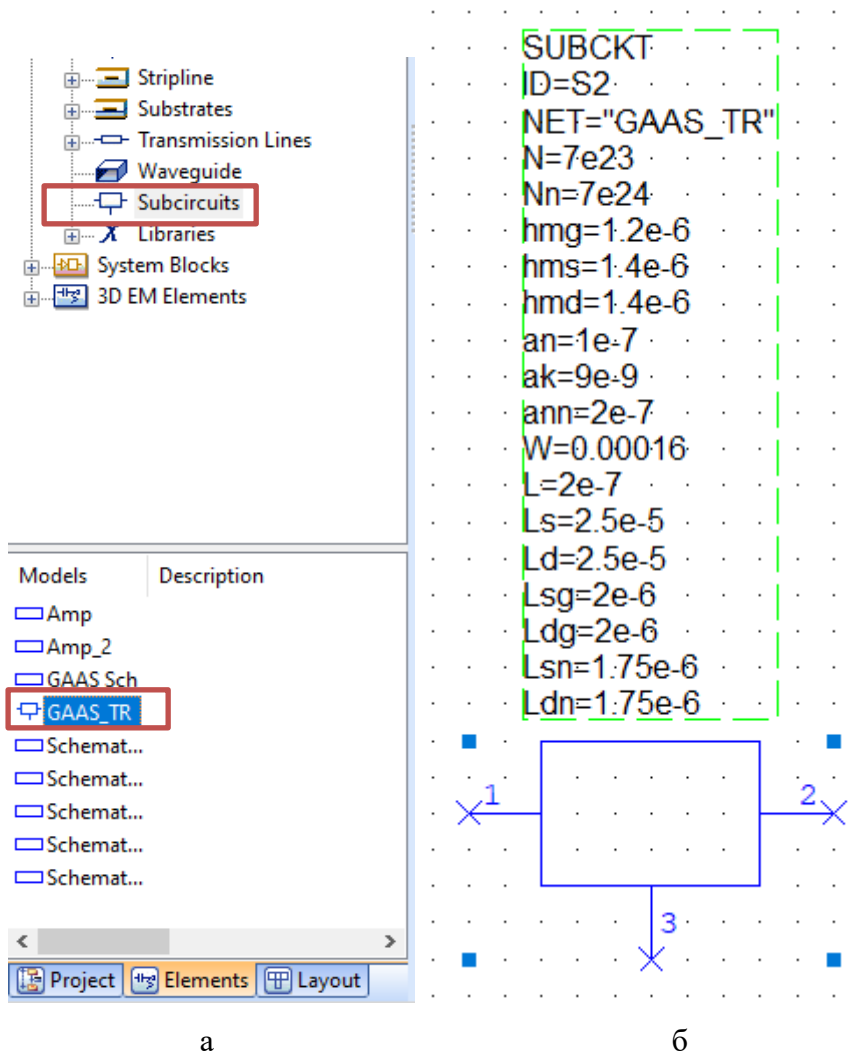


Рисунок 3.3 – Добавление транзистора на схему

После добавления транзистор примет вид трехузлового компонента, показанный на рисунке 3.3, б. Чтобы изменить внешний вид символа (отображения на схеме), необходимо нажать ПКМ на транзисторе – **Properties...** ► Вкладка **Symbol** ► выбрать FET.

Далее необходимо изменить характеристики транзистора в среде AWR на характеристики, полученные в Mathcad.

3.3 Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов

Полевые транзисторы описываются двумя ВАХ:

$I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ – стоковая (выходная) характеристика (рисунок 3.4);

$I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ – стокзатворная (проходная) характеристика (рисунок 3.5).

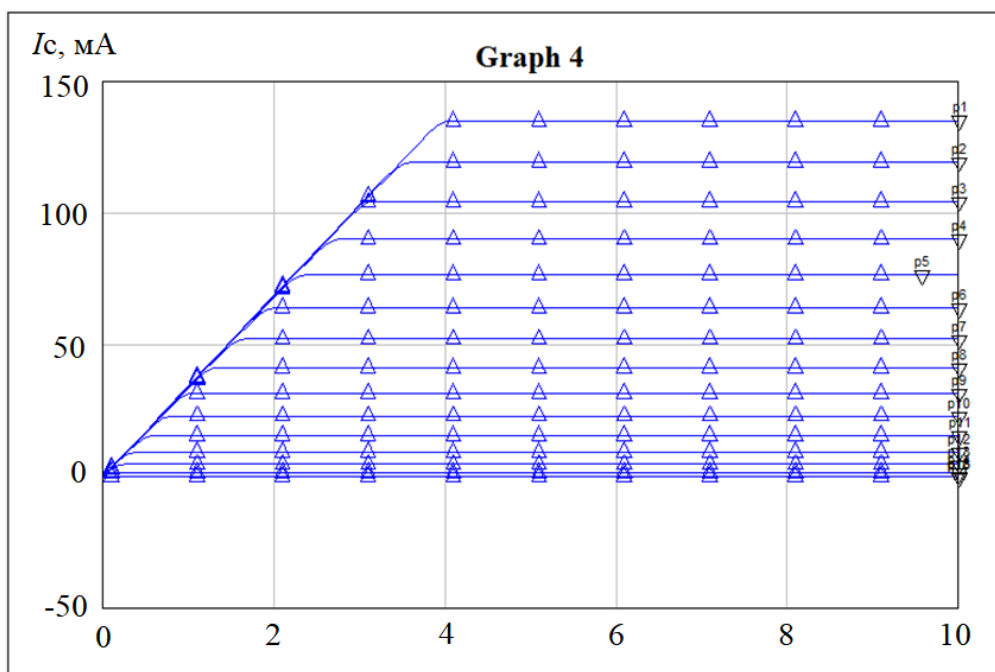


Рисунок 3.4 – Выходная ВАХ полевого транзистора

Разберем проходную ВАХ транзистора (рисунок 3.5) для $V_d = 4 \text{ В}$. В начале характеристики (область 1) отрицательное напряжение на затворе приводит к полному перекрытию канала (рисунок 3.6, а) зоной обеднения, и ток I_c стремится к нулю. После преодоления напряжения перекрытия канала V_{T0} область обеднения начинает уменьшаться (рисунок 3.6, б), а I_c возрастать, до того момента, пока канал полностью не будет открыт, после чего ток перестанет изменяться (область 3).

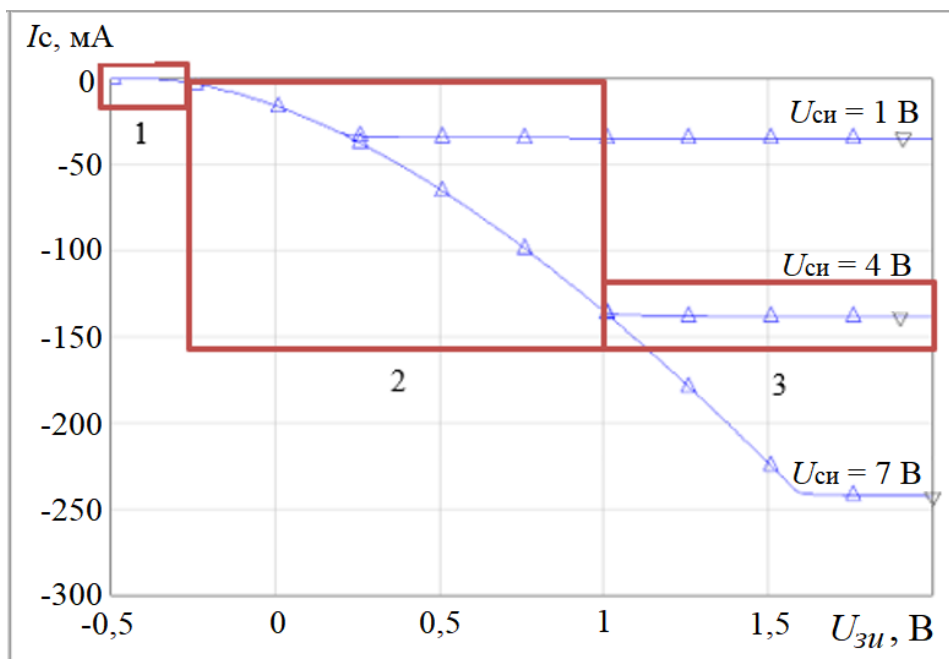
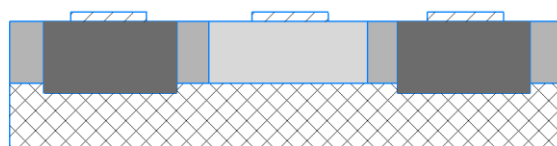
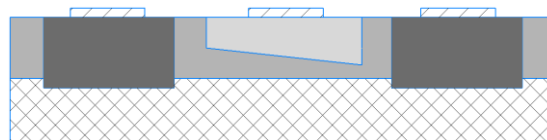


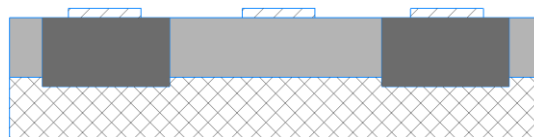
Рисунок 3.5 – Проходная ВАХ транзистора



а



б



в

Рисунок 3.6 – Визуализация канала и области обеднения полевого транзистора

При рассмотрении выходной ВАХ наблюдается следующее: как и в случае с входной ВАХ при условии $V_g < VT_0$ ток стремится к нулю при любом значении напряжения на стоке. При повышении V_g изменяется только максимальное значение тока, при этом на линейно-возрастающем участке изменение V_g не приводит к изменению тока.

Область на выходной характеристике, где увеличение V_d приводит к повышению тока, называется омической областью. Область, где нет повышения (пологая область) – область активной работы транзистора. Ток стока практически не зависит от напряжения сток-исток.

Одним из основных параметров, характеризующих усилительные свойства полевых транзисторов, является крутизна стокзатворной характеристики $dI_c/dU_{зи}$. Эта величина определяет влияние напряжения на затворе на изменение тока.

Например, при $V_d = 2$ В если изменить V_g со значения 0.7 В до 1 В ток не изменится. Это говорит о том, что если на затвор транзистора подавать, например, синусоидальный сигнал амплитудой 0,5 В, то ток на выходе не будет изменяться, что приведет к ослаблению сигнала.

3.4 Построение ВАХ транзистора в MWO

Для анализа характеристик биполярного транзистора необходимо построить его входную и выходную вольт-амперные (ВАХ) характеристики. Для анализа характеристик полевого транзистора зачастую используется выходная и проходная вольт-амперная характеристики. Построение можно выполнить двумя способами:

- 1) использовать два источника постоянного напряжения и измерить величины напряжений и токов (выходного или входного);
- 2) использовать в Microwave office измерительные блоки **IVCURVE** и **IVCURVEI** во вкладке **Elements ► MeasDevice ► IV**.

Рассмотрим второй способ построения ВАХ транзисторов.

Для построения семейства выходных ВАХ воспользуемся прибором **IVCURVE** и подключим его к транзистору как показано на рисунке 3.7. При этом исток заземлен, сток подключен к выходу SWP, а затвор подключен к выходу Step. При таком подключении для одной кривой ВАХ (при одном значении Step) программа изменяет значение Swp от start до stop с заданным шагом.

При построении графика зависимости $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ необходимо выбрать параметры, указанные на рисунке 3.8. Результаты измеренной выходной ВАХ показаны на рисунке 3.9.

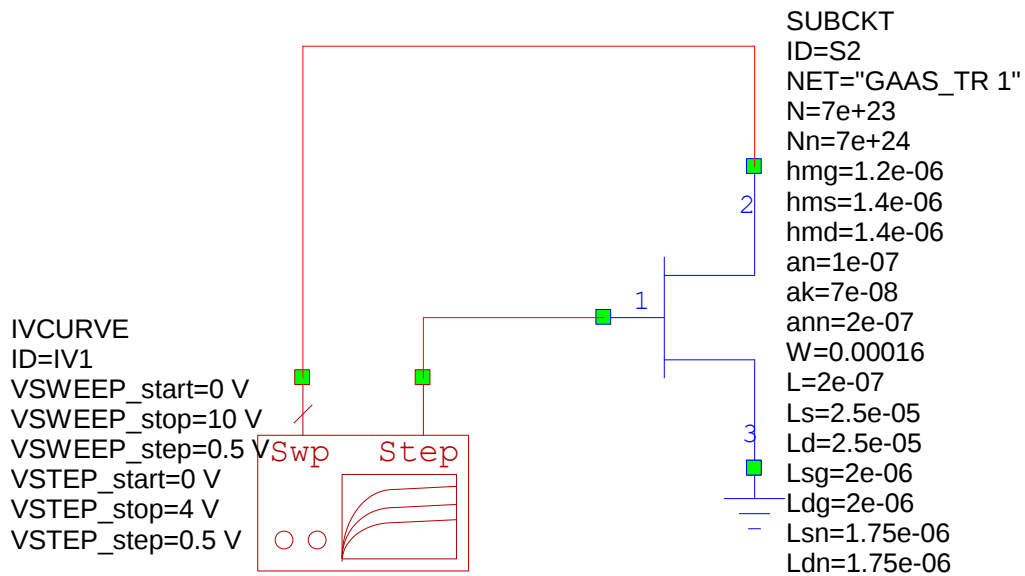


Рисунок 3.7 – Схема подключения полевого транзистора для измерения выходных ВАХ

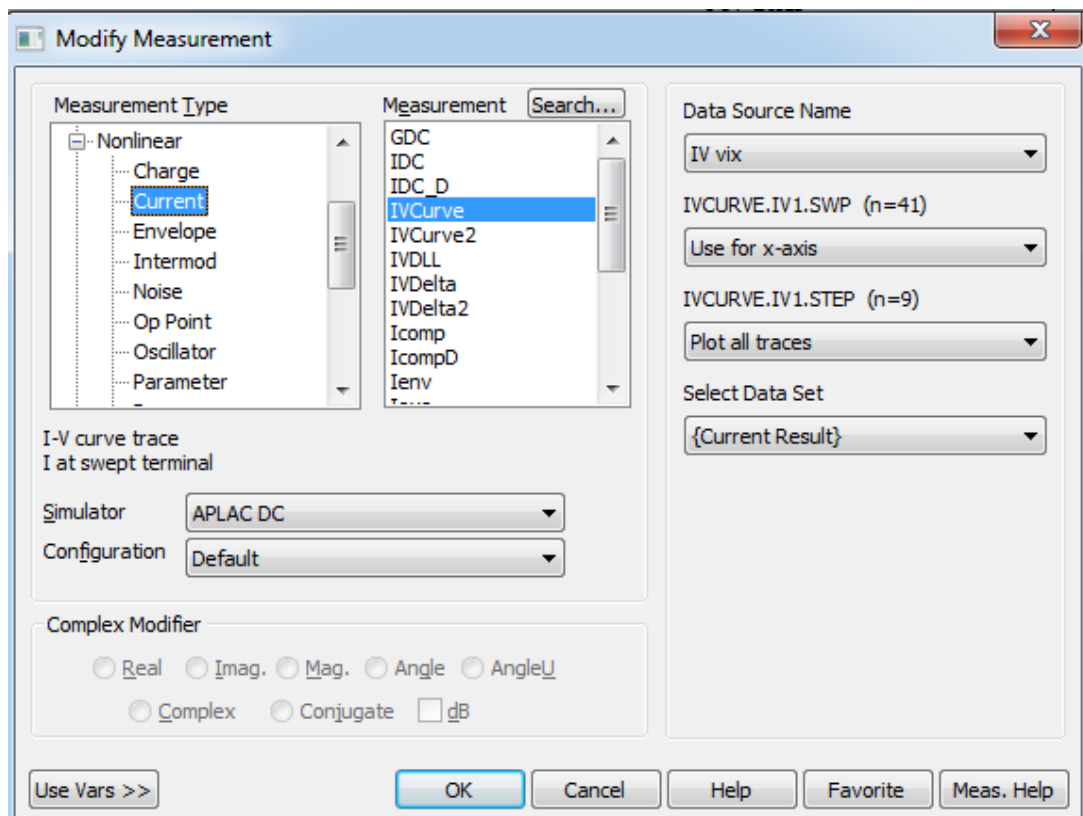


Рисунок 3.8 – Параметры графика для построения выходной ВАХ полевого транзистора

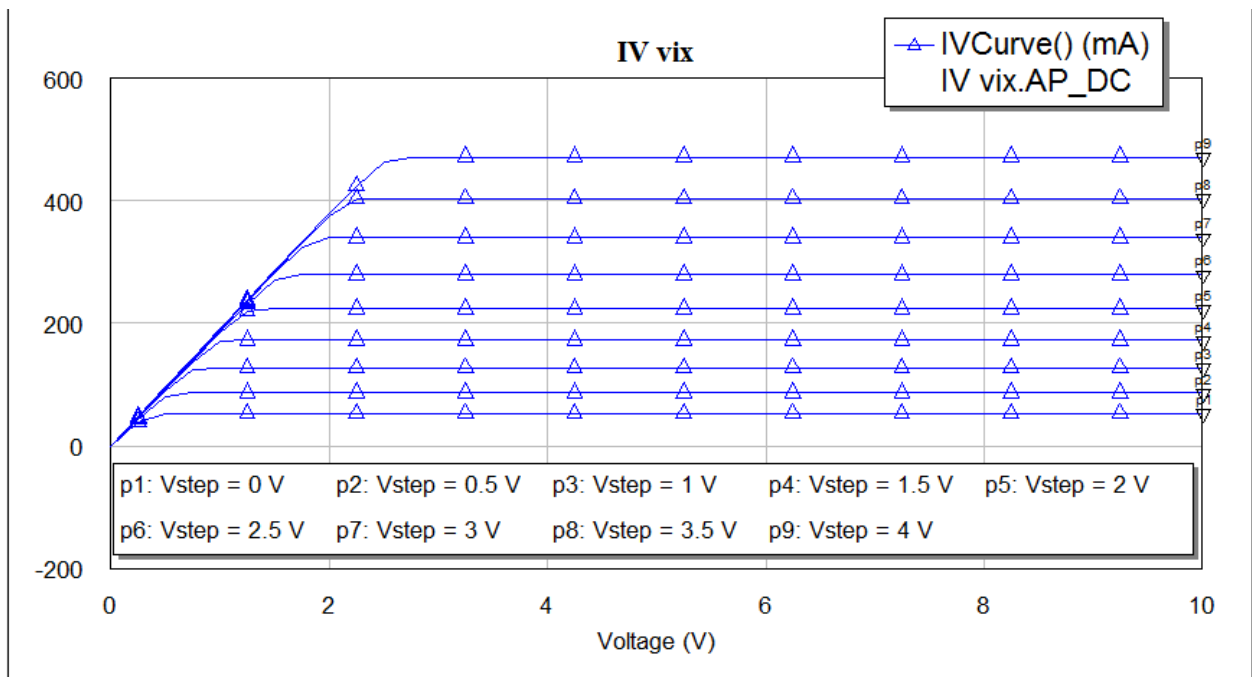


Рисунок 3.9 – Семейство выходных ВАХ полевого транзистора.

Для построения проходной ВАХ полевого транзистора схема должна выглядеть как показано на рисунке 3.10. При таком измерении нужно определить зависимость $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$. Параметры построения такого графика показаны на рисунке 3.11, а сами проходные характеристики на рисунке 3.12.

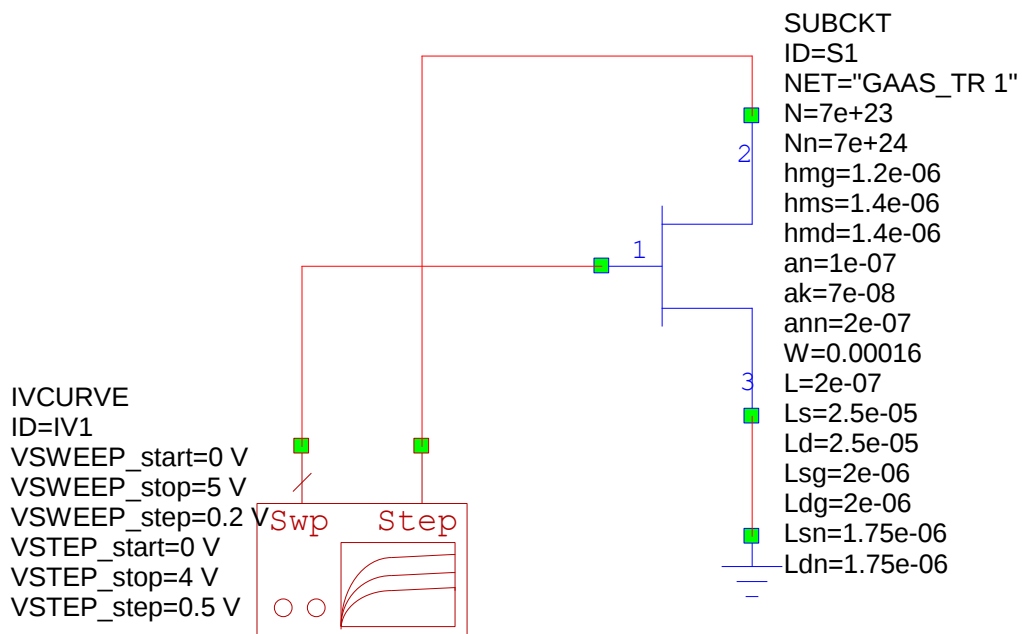


Рисунок 3.10 – Схема построения проходной ВАХ полевого транзистора

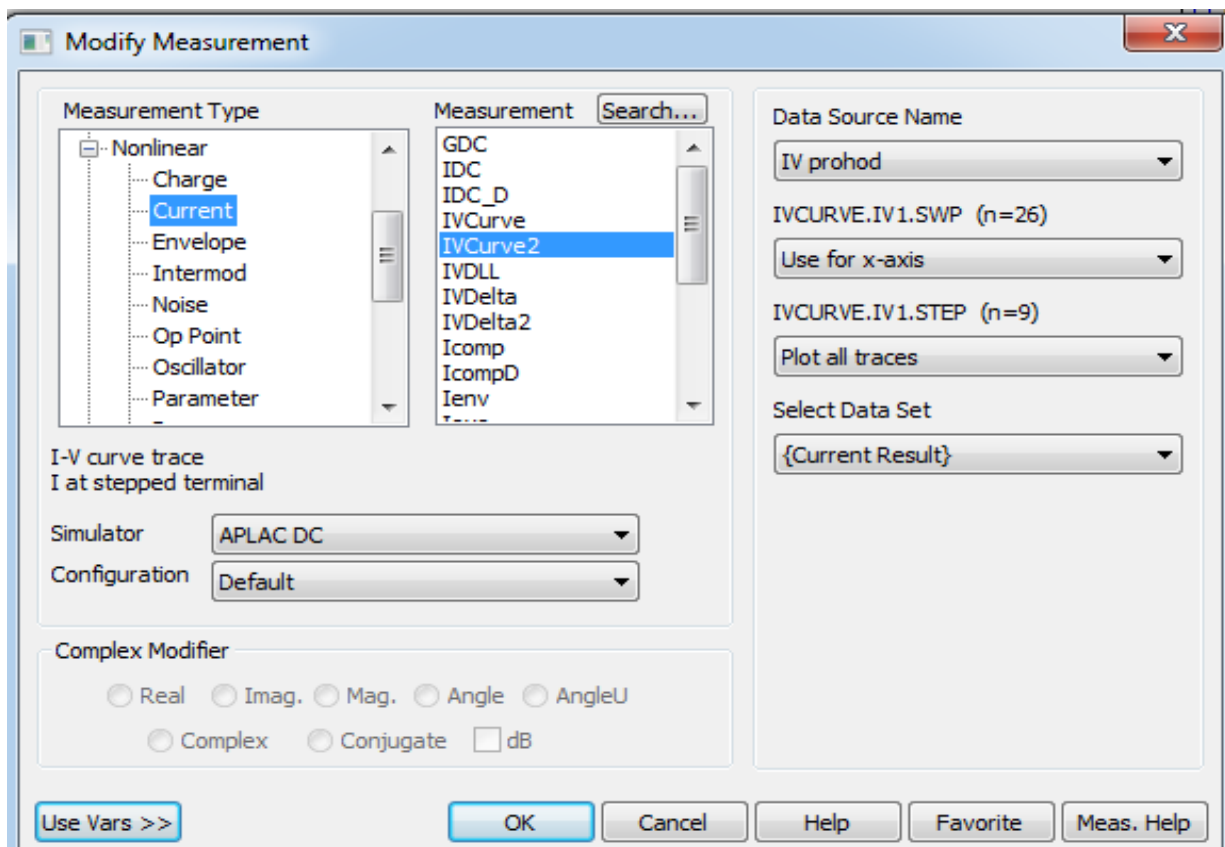


Рисунок 3.11 – Параметры построения проходной ВАХ полевого транзистора

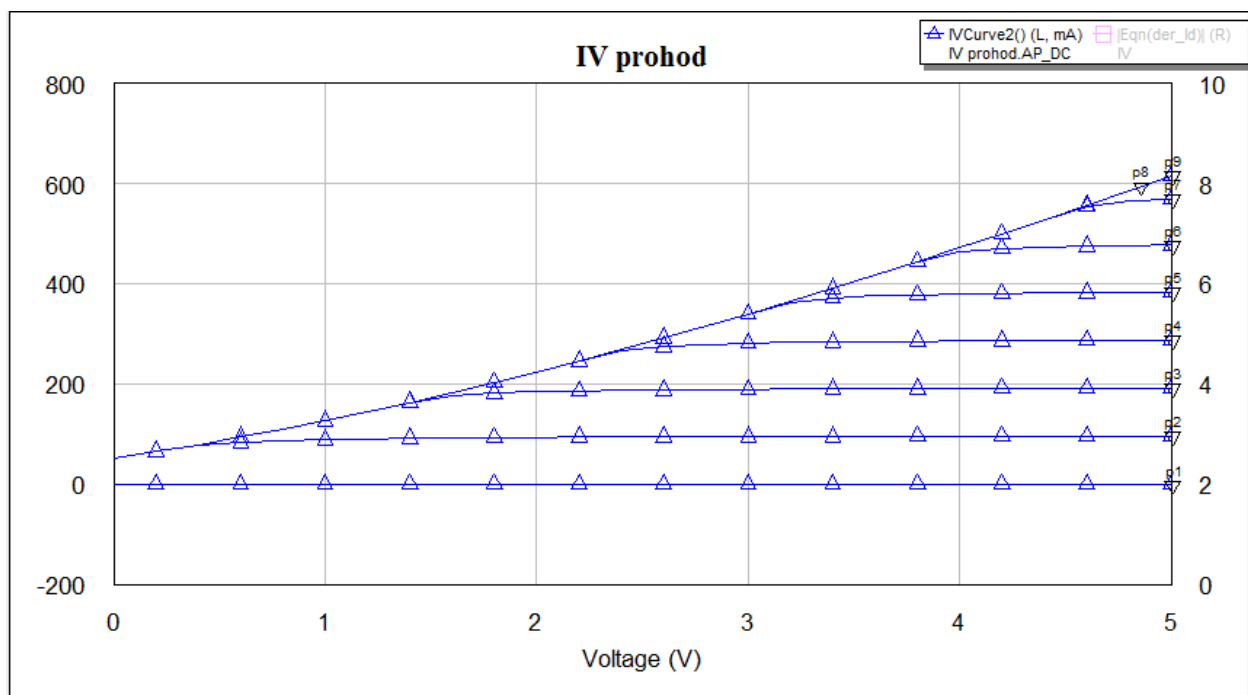


Рисунок 3.12 – Проходная ВАХ полевого транзистора

Задача: проанализировать влияние геометрических характеристик транзистора на входную и выходную характеристики. Полученные результаты анализа записать в отчет.

3.5 Анализ характеристик транзистора

Основным параметром, влияющим на усиление транзистора, является крутизна входной характеристики. Чем выше крутизна, тем большего усиления можно добиться. Наибольшая крутизна достигается в области, показанной на рисунке 3.13.

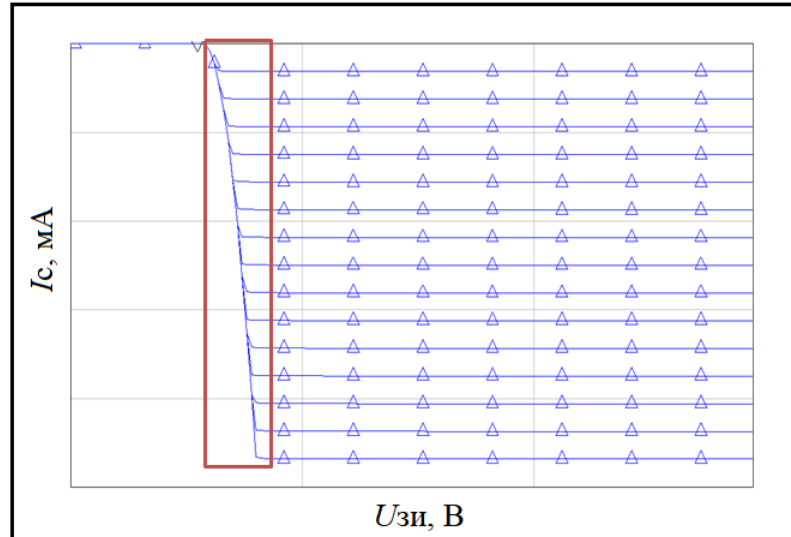


Рисунок 3.13 – График проходной ВАХ транзистора для определения крутизны

Для определения наибольшей крутизны характеристики удобнее построить производную функции проходной характеристики. Для этого нужно создать поле **Output Equation** и записать в переменную полученную проходную характеристику транзистора. После этого необходимо взять производную от этой функции и вывести на график.

```
Id = IV prohod.AP_DC:IVCurve2()
der_Id=der(Id[*],8),swpvals(Id))*100
```

Здесь в первой строке в переменную DGchar записывается проходная характеристика транзистора, а в переменную DG – производная (функция der). Производную функции достаточно рассчитать для зависимости при максимальном V_g . Т.к. в анализе присутствует 15 различных значений V_g , в квадратных скобках указывается средняя (8) характеристика. Умножения на 100 сделано для увеличения масштаба характеристики. После вывода характеристики будет получен следующий график (рисунок 3.14):

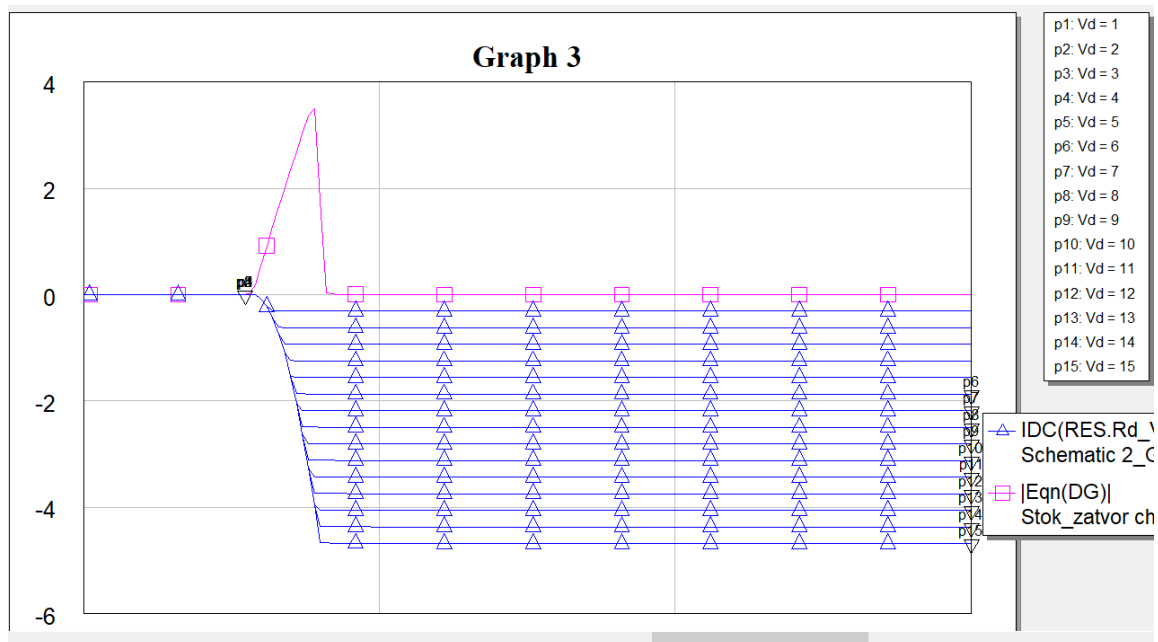


Рисунок 3.14 – График проходной ВАХ и зависимости крутизны от напряжения для средней кривой

Теперь задача сводится к смещению рабочей точки транзистора (напряжения на затворе) в точку с наибольшей крутизной характеристики. В данной точке будет получено максимальное усиление.

Последовательность выполнения задания после анализа ВАХ:

- 1) построить один каскад усилителя согласно схеме индивидуального задания;
- 2) определить коэффициент усиления, шума, частотных искажений;
- 3) вывести усилитель на режим работы с максимальной крутизной. Если схема не подразумевает регулировки рабочей точки, необходимо вернуться к ВАХ транзистора и вывести его на коэффициент усиления на максимальное значение при $V_g = 0$;
- 4) определить влияние компонентов схемы на заданные характеристики, выполнить подстройку усилителя для получения максимального коэффициента усиления;
- 5) если параметры усилителя не достигнуты требуемых, добавить каскад и повторить шаги.

3.6 Определение параметров усилителя

При построении схемы усилителя со стороны входа должен быть источник переменного напряжения ACVS (Вкладка Elements – Sources – AC – ACVS) с последовательным резистором с сопротивлением генератора согласно заданию; амплитуда ACVS Mag устанавливается согласно заданию. Со стороны выхода – резистор с сопротивлением нагрузки. В качестве источника/источников питания используется элемент

DCVS (Вкладка Elements – Sources – DC – DCVS), напряжение также устанавливается согласно заданию.

Альтернативный способ: вместо ACVS с резистором может быть использован элемент Port, которому задается сопротивление резистора генератора, сопротивление нагрузки также заменяется на Port с соответствующим сопротивлением. Т.к. некоторые характеристики могут быть определены только на схеме с портами, целесообразно воспользоваться альтернативным способом. При этом для расчета коэффициента усиления малошумящего усилителя необходимо выбирать параметр **VTG** во вкладке **Linear** -> **Gain**, для которого указывать входной и выходной порты схемы, а также её имя (рисунок 3.15).

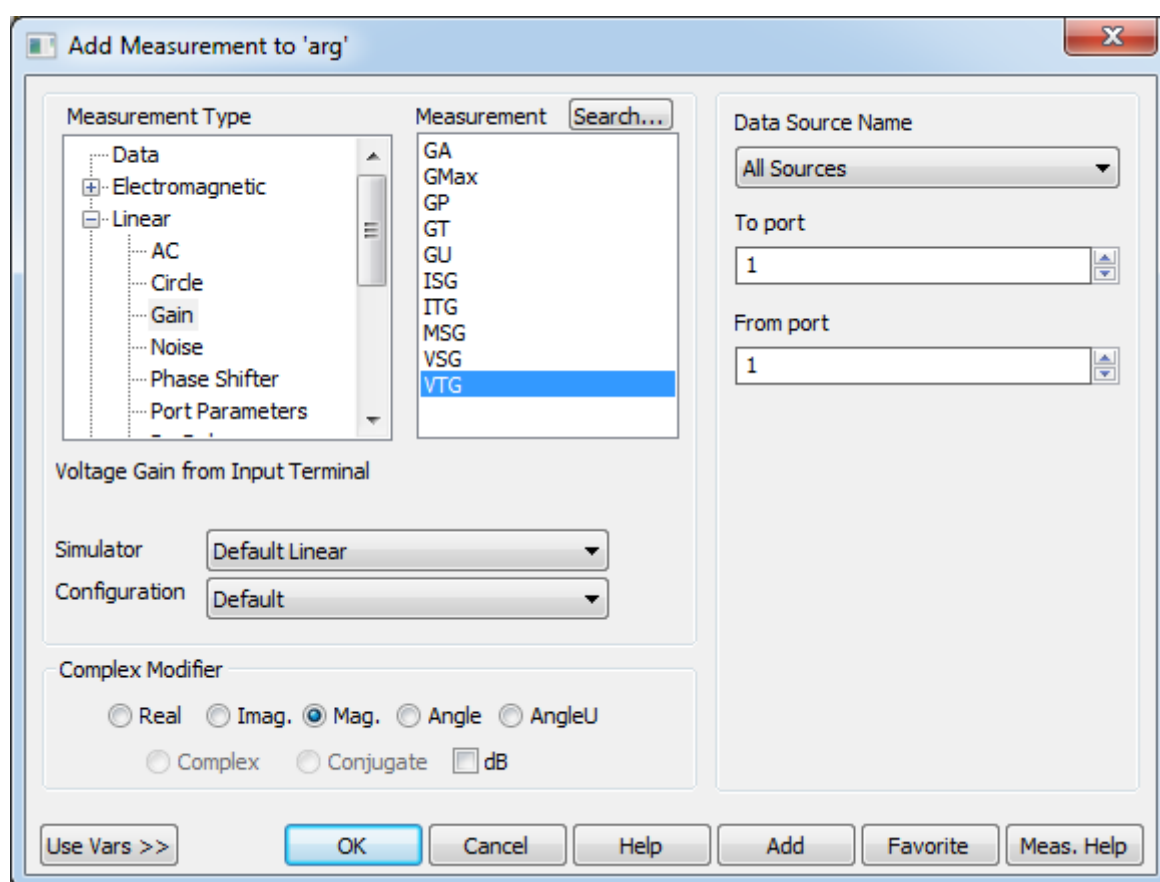


Рисунок 3.15 – Пример определения коэффициента усиления малошумящего усилителя

Определение коэффициента усиления. Для определения коэффициента усиления существует как минимум два способа. В первом способе необходимо создать новый **Output equation**, в который должны быть добавлены 3 выражения: V_{in} – частотная характеристика напряжения на входе, в качестве элемента выбрать ACVS; V_{out} – частотная характеристика напряжения на выходе (add output equation), выбрать сопротивление нагрузки; K – коэффициент усиления – V_{out}/V_{in} . Для альтернативного способа можно воспользоваться

встроенной функцией при построении графика: **Linear – Gain – VSG** (выбрать To port 2, From port 1).

Определение коэффициента шума: встроенная функция **Linear – Noise – NF**.

Определение коэффициента частотных искажений: в **Output equation** нужно добавить переменную, содержащую коэффициент усиления для схемы (K_y). После этого необходимо определить коэффициент усиления на центральной частоте ($K_y(f_c)$). Для этого можно воспользоваться функцией, определяющей размер массива (`asize`), и поделить это значение на два. Подставив полученное значение в качестве индекса массива в переменную, содержащую коэффициент усиления, можно получить необходимое значение.

После этого необходимо создать массив, элементами которого будут являться отношения коэффициента усиления на данной частоте ($K_y[x]$) к $K_y(m)$.

Пример:

```
G = AmpN:|VSG(2,1)|
size = asize(G)
Gm=G[int(size[1]/2)]
M=db(G/Gm)
```

По умолчанию результат функции `asize` – два числа, где первое – размер массива по оси x , второе – количество свипов, применяемых к данной функции, поэтому при использовании переменной `size` ставится индекс 1.

После достижения требуемых в индивидуальном задании характеристик можно перейти к этапу проектирования топологии интегральной схемы. При этом важно, чтобы полученные параметры элементов были достижимы с топологической точки зрения. В случаях, когда в результате расчета топологий происходит нарушение технологических норм, или компоненты занимают слишком большую площадь, что не позволяет соблюсти геометрические ограничения, необходимо вернуться к текущему шагу и выполнить перерасчет схемы.

4 Разработка топологии

4.1 Расчет геометрических параметров резисторов

При определении геометрии резистора основными и исходными схемотехническими данными для расчета являются следующие параметры: сопротивление резистора R , Ом; полная относительная погрешность изготовления пленочного резистора γ_R ; рассеиваемая мощность P , мВт; рабочий диапазон температур $T_{\max} - T_{\min}$, °С. Расчет геометрических размеров резисторов выполняется в определенной последовательности:

1. Определение оптимального сопротивления квадрата резистивной пленки с позиции минимальной занимаемой площади:

$$\rho_{S.\text{опт}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n 1/R_i}}, \quad (4.1)$$

где n – число резисторов;

R_i – номинал i -го резистора.

2. Выбор материала резистивной пленки с удельным сопротивлением, ближайшим по значению к вычисленному $\rho_{S.\text{опт}}$. При этом необходимо, чтобы температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала был минимальным, а удельная мощность рассеяния P_0 максимальной. В таблице 4.1 представлены основные параметры материалов тонкопленочных резисторов, применяемых при изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем (МИС).

3. Проверка правильности выбранного материала с точки зрения точности изготовления резисторов. Проверку проводят по условию, что погрешность коэффициента формы $\gamma_{\text{Кф}}$ не должна быть отрицательной при известных погрешностях, входящих в формулу полной относительной погрешности изготовления пленочного резистора $\gamma_R = \Delta R/R$:

$$\gamma_R = \gamma_{\text{Кф}} + \gamma_{\rho_s} + \gamma_T + \gamma_{R_{\text{ст}}} + \gamma_{R_K}, \quad (4.2)$$

где $\gamma_{\text{Кф}}$ – погрешность коэффициента формы, %;

γ_{ρ_s} – погрешность воспроизведения величины ρ_s резистивной пленки (зависит от условий напыления и материала резистивной пленки и в условиях серийного производства не превышает 5), %;

γ_T – температурная погрешность (зависит от ТКС материала пленки), %;

$\gamma_{R_{\text{ст}}}$ – погрешность, обусловленная старением пленки (не превышает 3% и зависит от материала пленки и эффективности защиты, а также от условий хранения и эксплуатации), %;

γ_{RK} – погрешность переходных сопротивлений контактов (зависит от технологических условий напыления пленок, удельного сопротивления резистивной пленки и геометрических размеров контактного перехода и обычно составляет 1-2), %.

Температурную погрешность можно рассчитать по следующей формуле:

$$\gamma_T = \alpha_R (T_{\max} - T_0), \quad (4.3)$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления материала пленки, $1/^\circ\text{C}$;

T_0 – температура при нормальных условиях (можно принять равной 20°C), $^\circ\text{C}$.

Таблица 4.1 – Электрофизические параметры резистивных пленок

Материал резистора	ρ_s , Ом/□	Диапазон сопротивлений R , Ом	P_0 , Вт/см ²	ТКС при $T=60\div 125^{\circ}\text{C}$, 1/ $^{\circ}\text{C}$	Стабильность пленки за 1000 часов работы, %
Хром (Cr)	500	50 – 30 000	1	$0,6\cdot 10^{-4}$	1,5 – 3
Нихром (NiCr)	300	50 – 30 000	2	$1\cdot 10^{-4}$	1,1 – 1,3
	10	1 – 10 000		$- 2,25\cdot 10^{-4}$	
	50	5 – 50 000			
Тантал (Ta)	100	100 – 10000	3	$- 2\cdot 10^{-4}$	1
	10	50 – 10000			
Нитрид тантала (TaN)	700	–	8	$- 10\cdot 10^{-4}$	0,1
Силицид хрома (CrSiO)	1 – 10 k	–	10	$- 25\cdot 10^{-4}$	–

4. Определение конструкции резисторов по значению коэффициента формы k_ϕ :

$$k_\phi = \frac{R_l}{\rho_s}. \quad (4.4)$$

Дальнейший расчет проводится относительно формы резисторов: при $1 \leq k_\phi \leq 10$ разрабатывают резистор прямоугольной формы, у которого длина l больше ширины b (прямоугольные полосковые резисторы); при $0,1 \leq k_\phi \leq 1$ – резистор прямоугольной формы, у которого длина меньше ширины; при $k_\phi \geq 10$ разрабатывают резистор сложной формы (формы меандр). Последний тип резисторов не реализуется в СВЧ электронике, так как на частотах выше нескольких МГц реактивная составляющая сопротивления влияет на модуль полного

сопротивления и может привести к искажению сигнала и снижению эффективности устройства.

Резистор с коэффициентом формы $1 \leq k_f \leq 10$. Для прямоугольных полосковых резисторов расчет начинают с определения ширины резистора. Ширина резистора определяется:

$$b_{\text{расч}} \geq \max(b_{\text{техн}}, b_{\text{точн}}, b_p), \quad (4.5)$$

где $b_{\text{техн}}$ – минимальная ширина резистора, обусловленная технологией изготовления, мкм;

$b_{\text{точн}}$ – ширина резистора, определяемая точностью изготовления, мкм;

b_p – минимальная ширина резистора, определяемая заданной мощностью рассеяния, мкм.

Ширину резистора $b_{\text{точн}}$ можно определить по следующей формуле:

$$b_{\text{точн}} \geq \frac{\Delta b + \Delta l / k_f}{\gamma_{k_f}}, \quad (4.6)$$

где $\Delta b, \Delta l$ – погрешности изготовления ширины и длины резистора, зависящие от метода изготовления, мкм.

Минимальная ширина резистора, определяемая заданной мощностью рассеяния:

$$b_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 k_f}}, \quad (4.7)$$

где P – расчетное значение мощности рассеяния резистора, Вт;

P_0 – максимальная удельная мощность рассеяния резистивной пленки, Вт/см².

После производят корректировку ширины резистора $b_{\text{расч}}$. Принимают ближайшее к $b_{\text{расч}}$ большее значение, кратное шагу координатной сетки. Для тонкопленочной технологии шаг координатной сетки обычно составляет 1 или 0,5 мм. Например, если шаг координатной сетки 1 мм, масштаб 20:1, то округление производят до величины, кратной 0,05 мм.

Расчетная длина резистора находится по формуле:

$$l_{\text{расч}} = b_{\text{расч}} \cdot k_f. \quad (4.8)$$

Далее определяют полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок:

$$l_{\text{полн}} = l_{\text{расч}} + 2e, \quad (4.9)$$

где e – размер перекрытия резистора и контактных площадок, мкм (принять равным в диапазоне 10 – 50 мкм).

Топология резистора должна иметь вид, представленный на рисунке 4.1. Контактные площадки резистора должны быть больше на величину Δh на 30 – 40 % от ширины резистора.

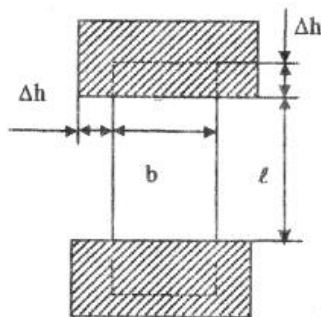


Рисунок 4.1 – Конструкция пленочного резистора

Резистор с коэффициентом формы $0,1 \leq k_\phi \leq 1$. Расчет резисторов таких резисторов начинают с определения длины:

$$l_{\text{расч}} \geq \max(l_{\text{техн}}, l_{\text{точн}}, l_p), \quad (4.10)$$

где $l_{\text{техн}}$ – минимальная ширина резистора, обусловленная технологией изготовления, мкм;

$l_{\text{точн}}$ – ширина резистора, определяемая точностью изготовления, мкм;

l_p – минимальная ширина резистора, определяемая заданной мощностью рассеяния, мкм.

Длину резистора $l_{\text{точн}}$ можно определить по следующей формуле:

$$l_{\text{точн}} \geq \frac{\Delta l + \Delta l / k_\phi}{\gamma_{k_\phi}}, \quad (4.11)$$

где Δb , Δl – погрешности изготовления ширины и длины резистора, зависящие от метода изготовления, мкм (принять равной 0,01 мкм).

Минимальная ширина резистора, определяемая заданной мощностью рассеяния:

$$l_p = \sqrt{\frac{P}{P_0 k_\phi}}. \quad (4.12)$$

После производят корректировку ширины резистора $l_{\text{расч}}$. Принимают ближайшее к $l_{\text{расч}}$ большее значение, кратное шагу координатной сетки. Для тонкопленочной технологии шаг координатной сетки обычно составляет 1 или 0,5 мм. Например, если шаг координатной сетки 1 мм, масштаб 20:1, то округление производят до величины, кратной 0,05 мм.

Расчетная ширина резистора находится по формуле:

$$b_{\text{расч}} = \frac{l_{\text{расч}}}{k_\phi}. \quad (4.13)$$

Далее определяют полную длину резистора с учетом перекрытия контактных площадок:

$$l_{\text{полн}} = l_{\text{расч}} + 2e. \quad (4.14)$$

После определения ширины резистора необходимо удостовериться, что резистор спроектирован корректно. Условием корректности является не превышение табличного значения удельной мощности рассеяния выбранного материала относительно расчетной удельной мощности:

$$\frac{P_{\text{расч}}}{S} \leq P_0. \quad (4.15)$$

В случае невыполнения данного условия по рассеиваемой мощности необходимо выбрать другой материал резистора, номинал резисторов и провести расчет заново. Также резисторы должны иметь размеры не превышающие 200x150 мкм. В случае невыполнения данного условия по площади необходимо выбрать другой материал резистора, номинал резисторов и провести расчет заново.

4.2 Расчет геометрических параметров конденсаторов

Конденсатор представляет собой трехслойный элемент нижняя обкладка – диэлектрик – верхняя обкладка (рисунок 4.2). Исходными данными для конструктивного расчета тонкопленочных конденсаторов являются следующие параметры: номинальная емкость C , Ф; допуск на номинал γ_C , %; рабочее напряжение U_p , В; рабочий диапазон температур рабочий диапазон температур $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$, °С.

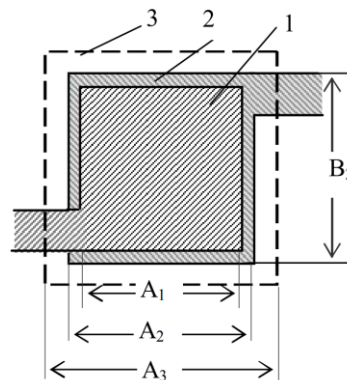


Рисунок 4.2 – Конструкции пленочных конденсаторов:

1 – верхняя обкладка; 2 – нижняя обкладка; 3 – диэлектрик

Расчет геометрических размеров конденсаторов выполняется в определенной последовательности:

1. Определить материал диэлектрика по рабочему напряжению в соответствии с данными, приведенными в таблице. При подборе материала важно чтобы конденсатор занимал меньшую площадь поэтому выбирается материал с возможно более высокой удельной емкостью C_0 , диэлектрической проницаемостью ϵ , электрической прочностью $E_{\text{проб}}$, а также малыми значениями ТКЕ и $\text{tg}\delta$. В таблице 4.2 представлены электрофизические

параметры диэлектрических материалов для расчета топологических размеров тонкопленочных конденсаторов.

Таблица 4.2 – Электрофизические характеристики диэлектриков

Материал диэлектрика	C_0 , пФ/см	ϵ при частоте 1 кГц	$E_{\text{проб}}$, В/см	$\text{tg}\delta$ при частоте 1 кГц	ТКЕ при $T = -60 \div 125$ °C
SiO	5000-10000	6÷8	$2 \cdot 10^6$	0,01 – 0,02	$2 \cdot 10^{-4}$
SiO ₂	5000	4	$5 \cdot 10^6$	0,02	$2 \cdot 10^{-4}$
Si ₃ N ₄	–	7,6	10^7	–	–
Al ₂ O ₃	–	7÷10	$4 \cdot 10^6$	–	–
Ta ₂ O ₅	60000 – 200000	22÷25	$4 \cdot 10^6$	0,02	$4 \cdot 10^{-4}$

2. Определить минимальную толщину диэлектрика из условия выполнения электрической прочности:

$$d_{\min} \geq \frac{k_3 U_p}{E_{\text{проб}}}, \quad (4.16)$$

где k_3 – коэффициент запаса по напряжению ($k_3=2-3$);

$E_{\text{проб}}$ – электрическая прочность диэлектрика, В/см²;

U_p – рабочее напряжение, В.

Оптимальной толщиной диэлектрика считается толщина 0,2 – 0,5 мкм.

3. Определить относительную погрешность активной площади конденсатора:

$$\gamma_s = \gamma_c - \gamma_{c_0} - \gamma_{ct} - \gamma_{c_{ct}}, \quad (4.17)$$

где γ_c – суммарная относительная погрешность емкости конденсатора, %;

γ_{c_0} – относительная погрешность удельной емкости, характеризующая ее воспроизводимость, зависит от материала и погрешности толщины диэлектрика (составляет 5-10%), %;

γ_{ct} – температурная погрешность, которая зависит от ТКС материала диэлектрика, %;

$\gamma_{c_{ct}}$ – относительная погрешность, обусловленная старением пленок конденсатора, и зависит от свойств пленки (обычно не бывает выше 2-3%), %.

Температурную погрешность конденсатора можно определить по следующей формуле:

$$\gamma_{ct} = a_c (T_{\max} - T_0), \quad (4.18)$$

где α_c – температурный коэффициент емкости материала пленки, $1/^\circ\text{C}$;

T_0 – температура при нормальных условиях (можно принять равной 20°C).

4. Определить удельную емкость конденсатора, исходя из необходимости обеспечения его электрической прочности:

$$C_0^d = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d_{\min}}, \quad (4.19)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала пленочного конденсатора;

ε_0 – электрическая постоянная.

5. Определить удельную емкость конденсатора, исходя из требуемой точности его изготовления:

$$C_0^{\text{точн}} = C \left(\frac{\gamma_s}{2 \cdot \Delta S} \right)^2, \quad (4.20)$$

где ΔS – абсолютная погрешность воспроизведения размеров конденсатора.

6. Выбрать минимальное значение удельной емкости C_0 , учитывая электрическую прочность и точность изготовления:

$$C_0 = \min \{ C_0^d, C_0^{\min} \}. \quad (4.21)$$

7. Определить коэффициент $k_{\text{кр}}$, учитывающий краевой эффект:

$$k_{\text{кр}} = \begin{cases} 1 & \text{при } C/C_0 \geq 0,05 \text{ см}^2 \\ 1,3-6 \cdot C/C_0 & \text{при } C/C_0 \leq 0,05 \text{ см}^2 \end{cases}. \quad (4.22)$$

8. Определить площадь верхней обкладки:

$$S = \frac{C}{C_0 k_{\text{кр}}}. \quad (4.23)$$

9. Определить геометрические размеры верхней обкладки (полученные значения необходимо округлить до величины, кратной шагу координатной сетки):

$$A_1 = B_1 = AB_1 = \sqrt{S}. \quad (4.24)$$

10. Определить геометрические размеры нижней обкладки:

$$A_2 = B_2 = AB_2 + 2q. \quad (4.25)$$

где q – размер перекрытия верхней нижней обкладки конденсатора, см (принять равной $0,002$ см).

11. Определить размеры диэлектрика конденсатора:

$$A_3 = B_3 = AB_2 + f, \quad (4.26)$$

где f – величина перекрытия нижней обкладки и диэлектрика, см (принять равной 0,002 см).

После определения геометрических размеров конденсатора необходимо проверить корректность расчёта. Конденсатор спроектирован правильно, если рабочая напряженность электрического поля не должна превышать $E_{\text{проб}}$, что является вторым условием корректности расчета:

$$\frac{U_p}{d} \leq E_{\text{проб}} . \quad (4.29)$$

В случае невыполнения данных условия необходимо выбрать другой материал конденсатора провести расчет заново. Также конденсаторы должны иметь размеры не превышающие 200х200 мкм.

Подробно с методиками расчета можно ознакомиться в источниках [4 – 5].

4.3 Разработка топологии усилителя и фотошаблонов

Разработку топологии можно проводить в любой знакомой CAD-системе, например, Компас 3D или Solid Works. Пример готовой разработанной топологии приведен на рисунке 4.3. Размер подложки GaAs (кристалла) принять равным 1,5х2,5 мм. Размер контактных площадок и общей нулевой точки принять равным 350х350 мкм и 200х200 мкм соответственно. В случае отсутствия возможности разместить все разработанные элементы на поверхности кристалла размером 1,5х2,5 мм необходимо разрешается увеличить размеры кристалла до 2,0х3,0 мм.

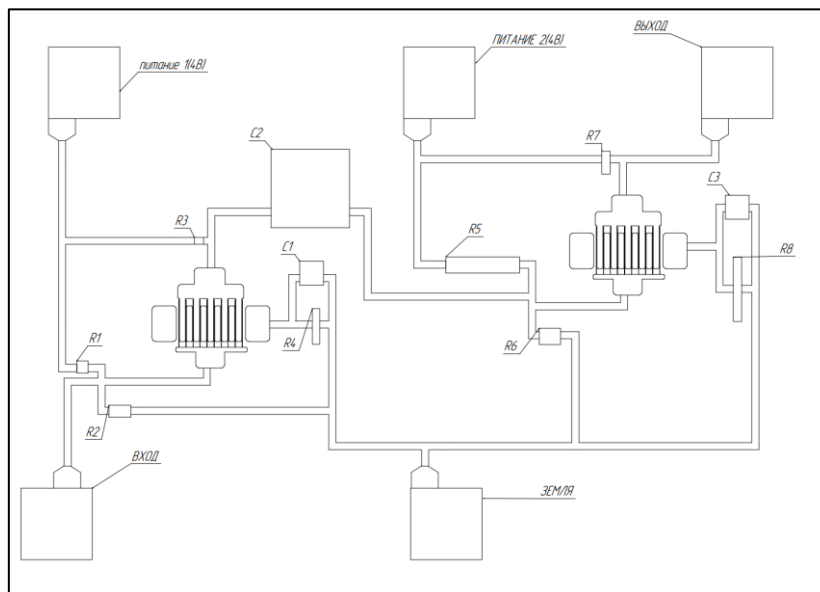


Рисунок 4.3 – Пример реализации топологии усилителя

Разработку следует проводить в следующей последовательности: формирование геометрии транзисторов, формирование геометрии резисторов и конденсаторов, и на последнем этапе формирование контактных площадок, межэлементной коммутации и общей нулевой точки. Размер подложки GaAs (кристалла) принять равным 1,5х2,5 мм.

На рисунке 4.4 представлена геометрия транзистора в соответствии с используемой SPICE-моделью при расчете усилителя. Транзистор следует изобразить с тремя или четырьмя затворами как на рисунке 4.3. Длину транзистора принять равной ширине транзистора по SPICE-модели.

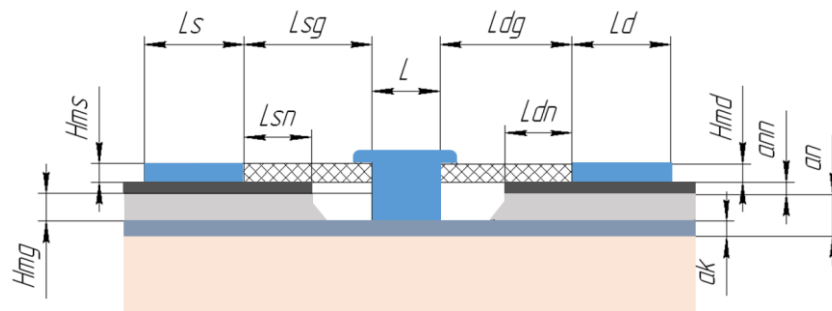


Рисунок 4.4 – Геометрические размеры транзистора с затвором Шоттки

Пример реализации фотошаблонов представлен на рисунках 4.5 – 4.6. В отчете должен быть комплект фотошаблонов на каждую операцию фотолитографии технологического маршрута.

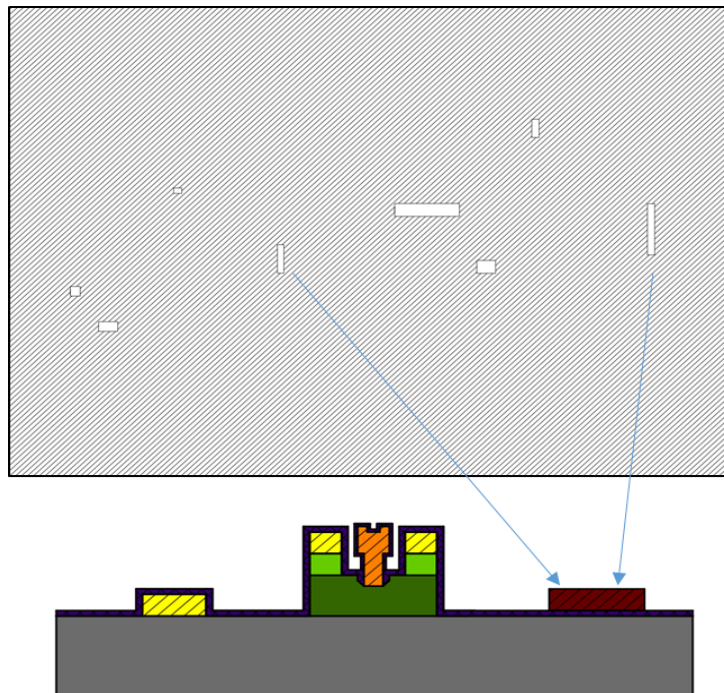


Рисунок 4.5 – Пример реализации фотошаблона резистивного слоя

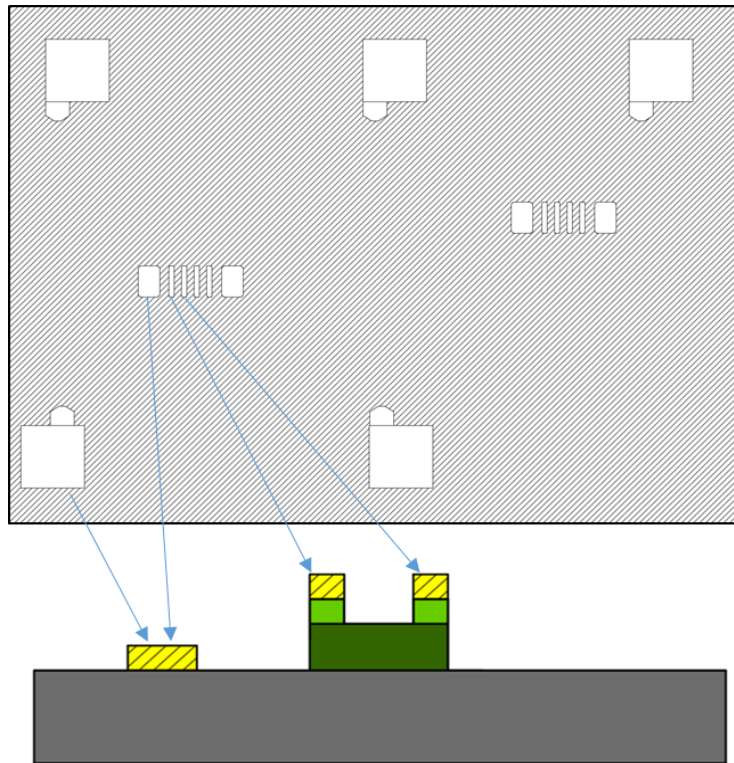


Рисунок 4.6 – Пример реализации фотошаблона формирования омических контактов

Разработку фотошаблонов следует проводить после формирования общей топологии усилителя. Размеры фотошаблонов и размещенных на них элементах топологического слоя должны соответствовать размерам элементов на топологии.

5 Технология изготовления

В данном разделе кратко рассмотрены материалы, применяемые при изготовлении СВЧ МИС и технология их изготовления. Рассмотрим на примере фрагмента МИС, изображенного на рисунке 5.1, основные технологические операции, необходимые для его формирования.

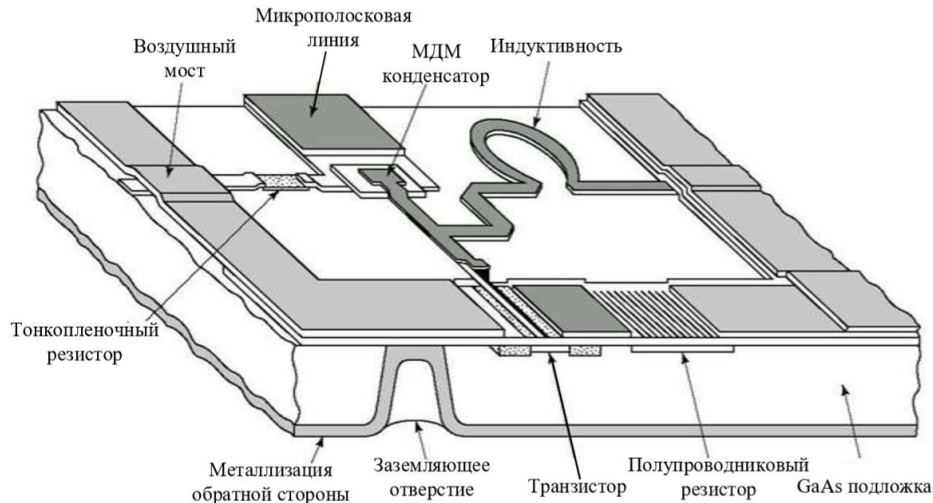


Рисунок 5.1 – Фрагмент полупроводниковой МИС на основе GaAs

При изготовлении МИС все активные и пассивные элементы формируются на поверхности подложки (GaAs) и в ее объеме по сформированному технологическому маршруту. Типовой технологический процесс изготовления МИС на основе GaAs представлен в виде блок-схемы на рисунке 5.2.

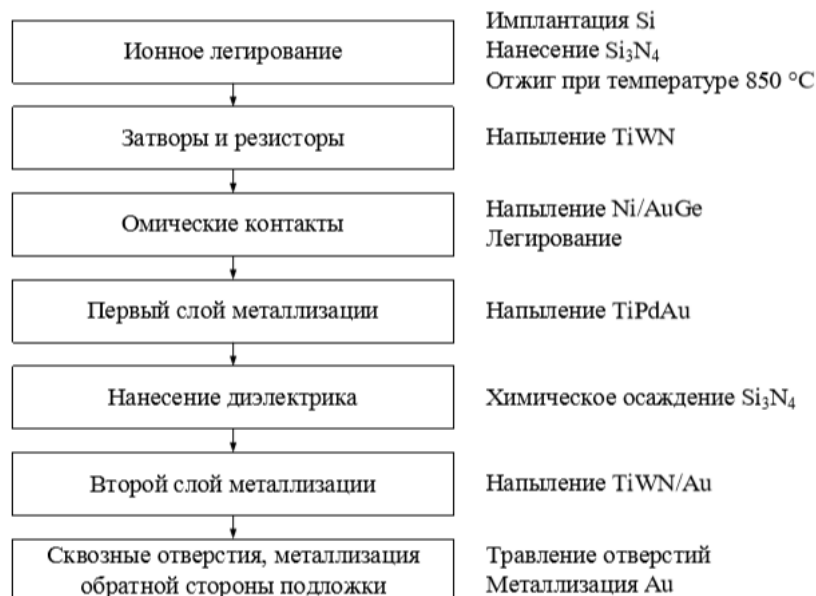


Рисунок 5.2 – Блок-схема типового технологического процесса изготовления МИС на основе GaAs

Как правило, в качестве межэлементных соединений используются микрополосковые линии. При формировании конденсаторов – наиболее распространенная структура металл-диэлектрик-металл (МДМ), однако, технология позволяет формировать и встречно-штыревые конденсаторы. В качестве резисторов используются резисторы полосковой формы. Посредством формирования сквозных металлизированных отверстий осуществляется заземление, в роли которого выступает обратная сторона подложки.

Остановимся более подробно на ключевых материалах, используемых при изготовлении МИС и получения на их основе тонких пленок.

Проводящие материалы. Проводники предназначены для формирования соединений между пассивными и активными компонентами схемы, а также для формирования контактных площадок. В качестве основных требований, предъявляемых к проводящему материалу, стоит выделить высокую проводимость, низкое сопротивление в СВЧ диапазоне, высокую адгезию к подложке, низкий температурный коэффициент расширения (ТКР), легкость травления, легкость пайки и разварки. Сопротивление определяется поверхностным сопротивлением и глубиной скин-слоя, что в свою очередь определяет толщину слоя металлизации. В таблице 5.1 приведены свойства основных материалов, применяемых для формирования слоев металлизации.

Таблица 5.1 – Параметры проводящих пленок и методы их формирования

Материал	Поверхностное сопротивление $\rho_s \cdot 10^{-7}$, Ом/□	Глубина скин-слоя δ на частоте 2 ГГц, мкм	ТКР $\cdot 10^{-6}$, 1/°C	Адгезия	Метод формирования
Ag	2,5	1,4	21	Неуд.	Напыление
Cu	2,6	1,5	18	Неуд.	Напыление
Au	3,0	1,7	15	Неуд.	Напыление
Al	3,3	1,9	26	Хор.	Напыление
Cr	4,7	2,7	9	Хор.	Напыление
Ta	7,2	4,0	6,6	Хор.	Электронно-лучевое напыление, Ионное распыление

Продолжение таблицы 5.1

Материал	Поверхностное сопротивление $\rho_s \cdot 10^{-7}$, Ом/□	Глубина скин-слоя δ на частоте 2 ГГц, мкм	ТКР $\cdot 10^{-6}$, 1/°C	Адгезия	Метод формирования
Ti	—	—	—	Хор.	Напыление, Магнетронное распыление
Mo	4,7	2,7	6	Уд.	Электронно-лучевое распыление, магнетронное распыление
W	4,7	2,6	4,6	Уд.	Магнетронное распыление, электроннолучевое распыление
Pt	—	3,6	9	—	Магнетронное распыление, электроннолучевое распыление

Диэлектрические и резистивные материалы. Диэлектрические пленки при изготовлении МИС используются в качестве изоляционного материала в конденсаторах, защитных слоев для активных устройств, межслоевой изоляции. Диэлектрик должен обладать высокой относительной диэлектрической проницаемостью, высоким напряжением пробоя, низким тангенсом угла диэлектрических потерь.

Резистивные материалы. Резистивные пленки при изготовлении МИС находят применение в цепях питания, цепях параллельной обратной связи по напряжению в усилителях. Резистор должен обладать определенным и стабильным поверхностным сопротивлением с низким ТКС [6]. Материалы, используемые для тонкопленочных резисторов, можно разделить на три группы: металлы; металлические сплавы; металлодиэлектрические смеси – керметы.

Основные материалы, применяемые при формировании резистивных и диэлектрических тонких пленок представлены в 4-ом разделе методического пособия в

таблице 4.1 – 4.2. В таблицах 5.2–5.3 представлены методы получения резистивных и диэлектрических тонких пленок и материал контактов к ним.

Таблица 5.2 – Методы получения тонких резистивных пленок

Материал резистора	ρ_s , Ом/□	Материал контактных площадок	Метод формирования
Хром	500	Медь	Напыление
Материал резистора	ρ_s , Ом/□	Материал контактных площадок	Метод формирования
Нихром	300	Золото с подслоем хрома	Напыление
	10		
	50		
Тантал	100	Ионное распыление	Ионное распыление

Таблица 5.3 – Методы получения тонких диэлектрических пленок

Материал диэлектрика	Материал обкладок	Метод формирования
SiO	Алюминий	Напыление
SiO ₂		Выращивание
Si ₃ N ₄	-	Осаждение из газовой фазы
Al ₂ O ₅	-	Анодирование
Ta ₂ O ₅	Тантал для нижней обкладки Алюминий для верхней обкладки	Анодирование

На рисунках 5.3 – 5.15 представлены технологические блоки и основные технологические операции для изготовления СВЧ МИС в качестве примера. Основные технологические операции необходимо описать с указанием технологических режимов и применяемых материалов. Структуру описываемых слоев разрабатываемого устройства оформлять согласно примеру на рисунках 4.5 – 4.6.

Этап 1. Формирование мезы (травление):

1. Очистка;
2. Нанесение фоторезиста;

3. Экспонирование;
4. Проявление;
5. Химическая активация;
6. Травление;
7. Удаление фоторезиста.

Этап 2. Формирование мезы (имплантация):

1. Очистка;
2. Нанесение фоторезиста;
3. Экспонирование;
4. Проявление;
5. Задубливание фоторезиста;
6. Имплантация;
7. Удаление фоторезиста.



Рисунок 5.3 – Формирование мезы

Этап 3. Формирование омических контактов:

1. Очистка;
2. Нанесение первого фоторезиста;
3. Нанесение второго фоторезиста;
4. Экспонирование;
5. Проявление второго слоя;
6. Проявление первого слоя;
7. Очистка;
8. Напыление металла;
9. Удаление фоторезиста.

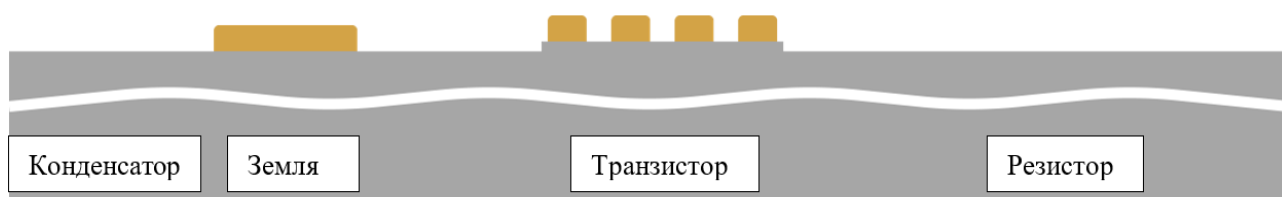


Рисунок 5.4 – Формирование омических контактов

Этап 4. Формирование рецесса:

1. Очистка;
2. Нанесение резиста;
3. Экспонирование;
4. Проявление;
5. Химическая активация;
6. Травление;
7. Удаление резиста;

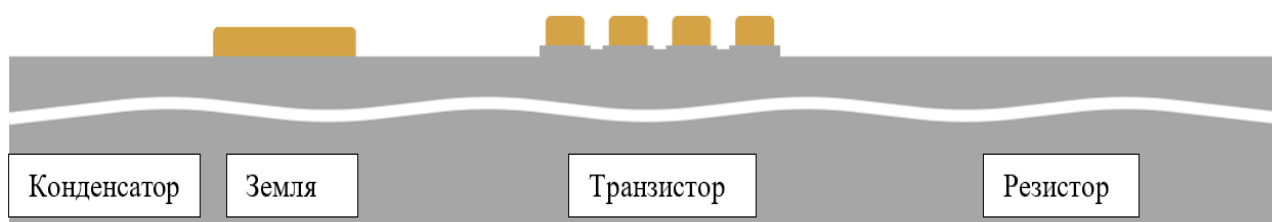


Рисунок 5.5 – Формирование рецесса

Этап 5. Формирование затвора:

1. Очистка;
2. Нанесение первого резиста;
3. Нанесение второго резиста;
4. Нанесение третьего резиста;
5. Экспонирование третьего и второго слоя;
6. Проявление третьего слоя;
7. Проявление второго слоя;
8. Очистка;
9. Экспонирование первого слоя;
10. Проявление первого слоя;
11. Задубливание резиста;
12. Очистка;
13. Формирование подзатворной области;
14. Химическая активация;
15. Напыление затвора;
16. Удаление резиста (взрыв).



Рисунок 5.6 – Формирование затвора

Этап 6. Пассивация затвора:

1. Очистка;
2. Осаждение диэлектрика.

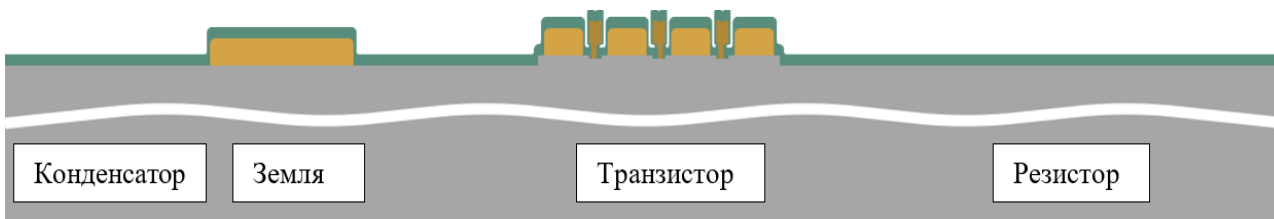


Рисунок 5.7 – Пассивация затвора

Этап 7. Формирование тела резистора:

1. Очистка;
2. Нанесение первого фоторезиста;
3. Нанесение второго фоторезиста;
4. Экспонирование;
5. Проявление второго слоя;
6. Проявление первого слоя;
7. Очистка;
8. Напыление металла;
9. Удаление фоторезиста.

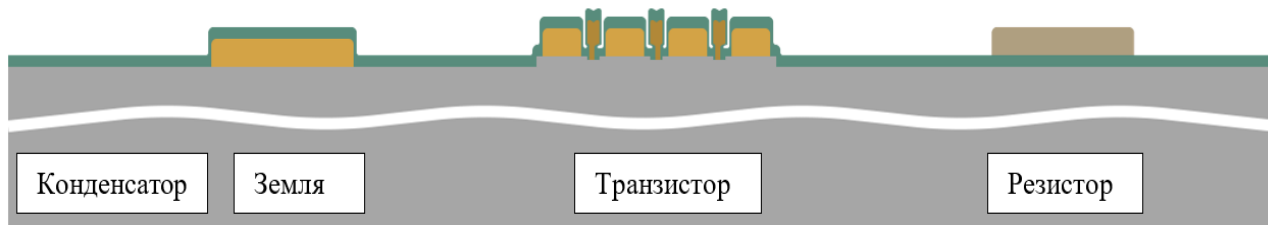


Рисунок 5.8 – Формирование тела резистора

Этап 8. Вскрытие окон в диэлектрике:

1. Очистка;
2. Нанесение фоторезиста;

3. Экспонирование;
4. Проявление;
5. Травление;
6. Удаление фоторезиста.

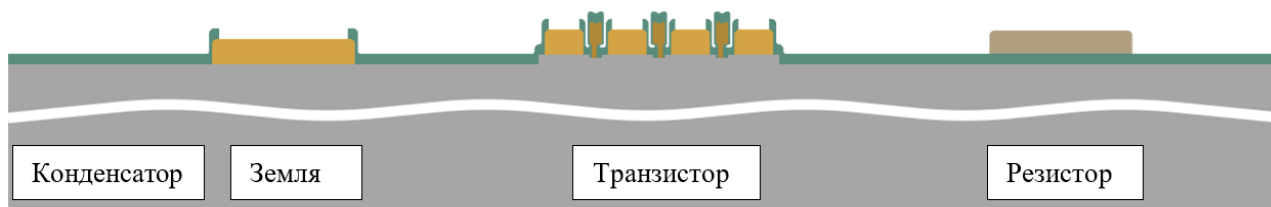


Рисунок 5.9 – Вскрытие окон в диэлектрике

Этап 9. Формирование 1-ого уровня металлизации:

1. Очистка;
2. Нанесение первого фоторезиста;
3. Нанесение второго фоторезиста;
4. Экспонирование;
5. Проявление второго слоя;
6. Проявление первого слоя;
7. Очистка;
8. Напыление металла;
9. Удаление фоторезиста.

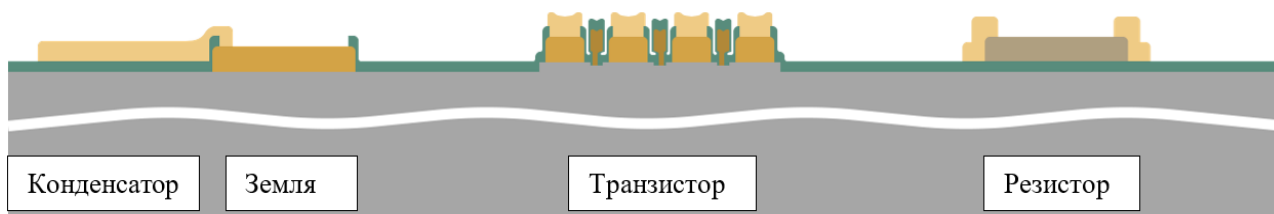


Рисунок 5.10 – Формирование 1-ого уровня металлизации

Этап 10. Формирование диэлектрика конденсатора:

1. Очистка;
2. Осаждение диэлектрика;
3. Нанесение фоторезиста;
4. Экспонирование;
5. Проявление;
6. Травление;
7. Удаление фоторезиста.

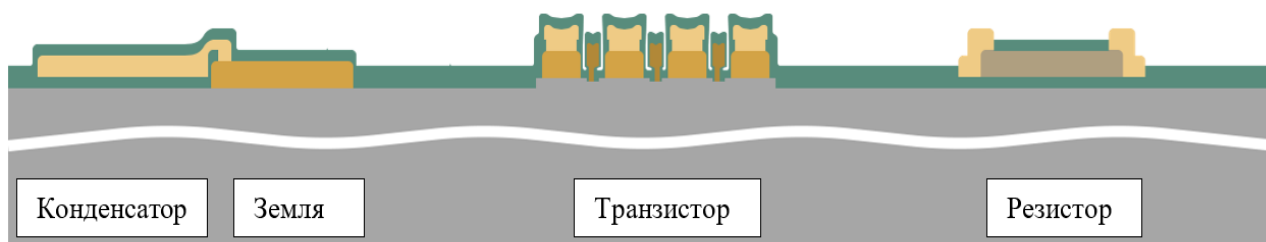


Рисунок 5.11 – Формирование диэлектрика конденсатора

Этап 11. Формирование верхней обкладки конденсатора:

1. Очистка;
2. Нанесение первого фоторезиста;
3. Нанесение второго фоторезиста;
4. Экспонирование;
5. Проявление второго слоя;
6. Проявление первого слоя;
7. Очистка;
8. Напыление металла;
9. Удаление фоторезиста.

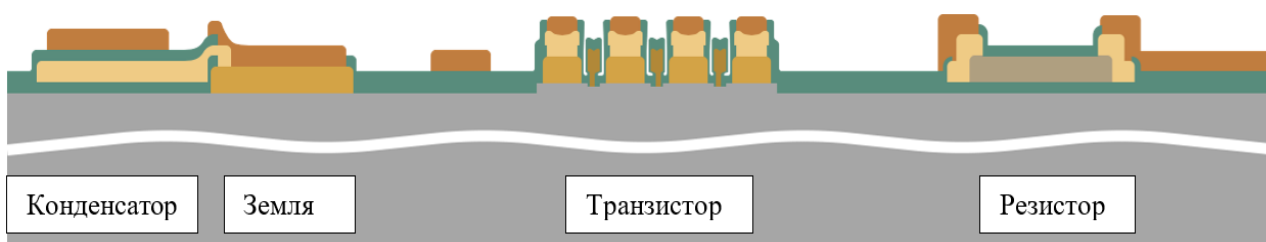


Рисунок 5.12 – Формирование верхней обкладки конденсатора

Этап 12. Формирование 2-ого уровня металлизации (через диэлектрик):

1. Очистка;
2. Осаждение диэлектрика;
3. Нанесение фоторезиста;
4. Экспонирование;
5. Проявление;
6. Травление;
7. Удаление фоторезиста;
8. Нанесение первого фоторезиста;
9. Нанесение второго фоторезиста;
10. Экспонирование;

11. Проявление второго слоя;
12. Проявление первого слоя;
13. Очистка;
14. Напыление металла;
15. Удаление фоторезиста.

Этап 13. Формирование 2-ого уровня металлизации (через воздушный мост)

1. Очистка;
2. Нанесение первого фоторезиста;
3. Экспонирование;
4. Проявление первого слоя;
5. Очистка;
6. Напыление затравочного слоя металла;
7. Нанесение второго фоторезиста;
8. Экспонирование;
9. Проявление второго слоя;
10. Электрохимическое осаждение;
11. Удаление второго фоторезиста;
12. Травление затравочного слоя;
13. Удаление первого фоторезиста.

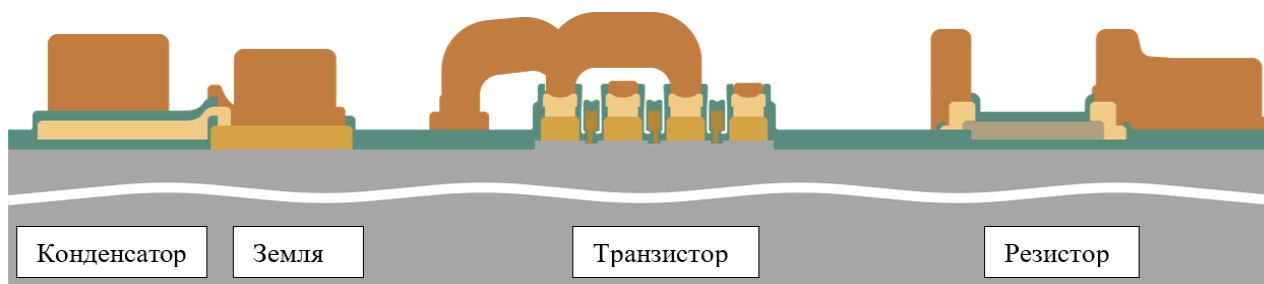


Рисунок 5.13 – Формирование 2 уровня металлизации (через воздушный мост)

Этап 14. Формирование пассивирующего слоя:

1. Очистка;
2. Осаждение диэлектрика;
3. Нанесение полимерного пассивирующего покрытия;
4. Экспонирование;
5. Проявление;
6. Травление диэлектрика.

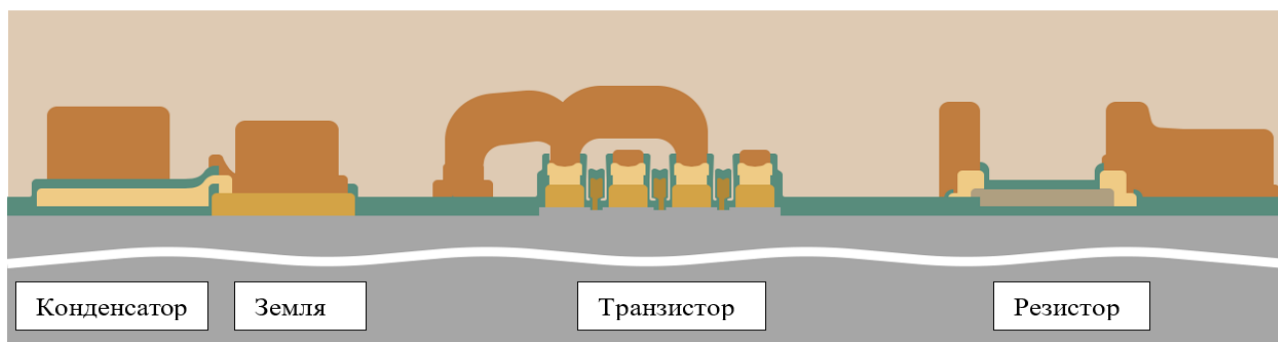


Рисунок 5.14 – Формирование пассивирующего слоя

Этап 15. Формирование отверстий и металлизации:

1. Очистка;
2. Нанесение фоторезиста;
3. Экспонирование;
4. Проявление;
5. Травление;
6. Удаление фоторезиста;
7. Очистка;
8. Осаждение затравочного слоя;
9. Электрохимическое осаждение.

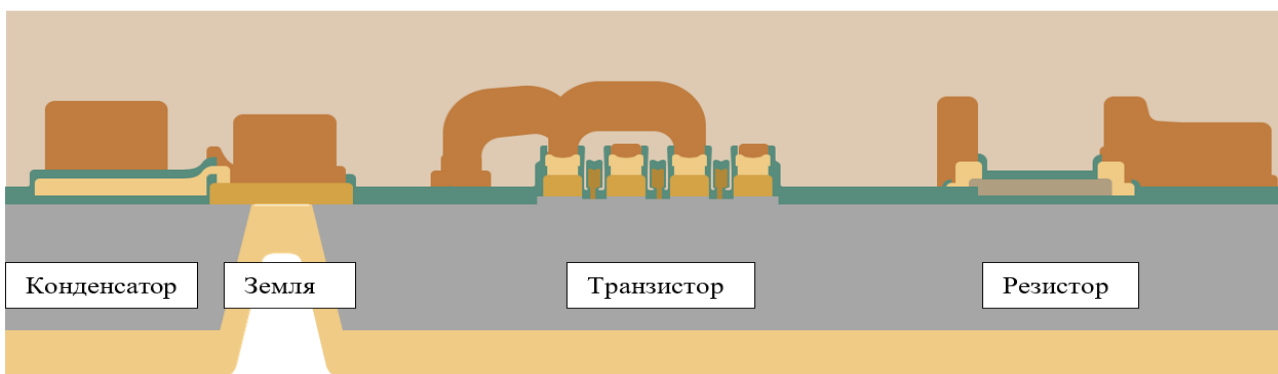


Рисунок 5.15 – Формирование отверстий и металлизации

Подробно с описанием технологических операций и этапами формирования технологических слоев можно ознакомиться в источниках [7 – 9].

Список используемых источников

1. Шеерман Ф. И. Проектирование СВЧ монолитных интегральных устройств на основе преобразования моделей элементов: спец. 05.12.07 «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07 / Ф. И. Шеерман ; Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. — Томск, 2007. — 27 с.
2. Романовский М. Н. Интегральные устройства радиоэлектроники. Основные структуры полупроводниковых интегральных схем: учеб. пособие. Ч. 1 / М. Н. Романовский. — Томск, 2012. — Ч. 1. — 123 с.
3. Жигальский А. А. Проектирование и конструирование микросхем: учеб. пособие / А. А. Жигальский. — Томск, 2007. — 195 с.
4. Романовский М.Н. Интегральные устройства радиоэлектроники. Проектирование интегральных схем на арсениде галлия / М. Н. Романовский, Е. В. Нефедцев. — Томск: ТУСУР, 2010. — 76 с.
5. Колосницын Б.С. Расчет параметров элементов интегральных микросхем: учеб.-метод. пособие / Б. С. Колосницын. — Минск, 2017. — 68 с.
6. Sobol H. Applications of integrated circuit technology to microwave frequencies / H. Sobol // Proceedings of the IEEE. — 1971. — Т. 59, № 8. — С. 1200-1211.
7. Sobol, H. Technology and design of hybrid integrated circuits / H. Sobol // Solid State Technology. — 1970. — Т. 13, № 10. — С. 49–57.
8. Александров Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: взгляд изнутри / Р. Александров // Компоненты и технологии. — 2005. — № 53. — С. 174–182.
9. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем: учеб. пособие / Т. И. Данилина. — Томск: Том. межвузов. центр дистанц. образования, 2006. — 164 с.

Приложение А
(обязательное)
Варианты заданий

Таблица А.1 – Варианты заданий

№	Амплитуда А, мкВ	Коэф. усиления К _{ус} , дБ	Полоса частот Δf, ГГц	Питание U _п , В	№ схемы	Фамилия
1	8	25	1–3,5	4	2	
2	2	30	1,5–3,5	4	2	
3	4	35	2–3,5	4	2	
4	6	40	2,5–3,5	4	3	
5	8	20	1–4	6	3	
6	2	25	1,5–4	6	3	
7	4	30	2–4	6	4	
8	6	35	2,5–4	6	4	
9	8	40	3–4	8	4	
10	2	20	0,5–3,5	8	1	
11	4	25	1–3,5	8	1	
12	6	30	1,5–3,5	8	1	

Требования к выходным характеристикам усилителя:

- коэффициент усиления: согласно таблице;
- коэффициент частотных искажений: не более 2 дБ;
- коэффициент шума: не более 4 дБ;
- КСВН: не более 3;
- входное и выходное сопротивление: 50 Ом.